



TRAITÉ

ÉLÉMENTAIRE

DE PHYSIQUE.

Les numéros entre parenthèses qui se trouvent dans le texte renvoient aux articles à consulter. Quand l'article se trouve dans un autre volume que le numéro de renvoi, ce volume est indiqué en chiffres romains.

La fraction placée à côté du numéro d'ordre de certaines figures indique le rapport entre les dimensions linéaires du dessin et celles de l'appareil figuré.

Toulouse. — Imprimerie de Bonnal et Gibrac, rue Saint-Rome, 46.

TRAITÉ

ÉLÉMENTAIRE

DE PHYSIQUE

THÉORIQUE ET EXPÉRIMENTALE

AVEC LES APPLICATIONS

A LA MÉTÉOROLOGIE ET AUX ARTS INDUSTRIELS

A L'USAGE

DES FACULTÉS, DES ÉTABLISSEMENTS D'ENSEIGNEMENT SECONDAIRE ET DES ÉCOLES SPÉCIALES DU GOUVERNEMENT.

PAR P. A. DAGUIN

ANCIEN ÉLÈVE DE L'ÉCOLE NORMALE,
PROFESSEUR DE PHYSIQUE A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE TOULOUSE.

DEUXIÈME ÉDITION
entièrement refondue, avec un grand nombre de figures intercalées dans le texte.



TOME SECOND.

TOULOUSE
ÉDOUARD PRIVAT
LIBRAIRE-ÉDITEUR,
Rue des Tourneurs, 45, hôtel Sipière.

PARIS
DEZOBRY & E. MAGDELEINE
LIBRAIRES-ÉDITEURS,
Rue des Écoles, 78.

1861

LIVRE IV.

DE LA CHALEUR.

683. Fluides impondérables. — En considérant l'ensemble des phénomènes naturels, les physiciens ont été conduits à admettre deux sortes de matière : l'une tangible et pesante, susceptible de se présenter sous les trois états, *solide*, *liquide* et *gazeux* ; l'autre impalpable, sans pesanteur appréciable, d'une mobilité et d'une subtilité extrêmes, et produisant les phénomènes de la *chaleur*, de la *lumière* et de l'*électricité*. La matière pondérable est disséminée dans l'espace en masses isolées, placées à des distances immenses les unes des autres ; les modifications qui s'y produisent se transmettent à travers sa substance avec des vitesses qui ne dépassent pas 5000^m par seconde, comme pour la propagation du son dans les solides. L'autre espèce de matière est répandue partout ; il n'y a pas de vide pour elle, et ses mouvements se propagent avec une rapidité extrême, de 70 000 *lieues* par seconde au moins. Cette grande mobilité a fait comparer cette espèce de matière à un fluide, et on lui a donné le nom de *fluide impondérable*, parce que l'on n'a pas pu lui trouver de poids appréciable.

Hypothèse de l'éther. — On a considéré longtemps les phénomènes de la *chaleur*, de la *lumière* et de l'*électricité*, comme dus à des fluides impondérables particuliers, de sorte que, dans ce système, la chaleur serait une espèce de matière, la lumière une autre espèce, etc. Mais à mesure que la science s'est perfectionnée, on a trouvé à faire des rapprochements de plus en plus nombreux entre ces différents ordres de phénomènes, et aujourd'hui on les regarde généralement comme dus à des mouvements imprimés à une substance unique, très élastique et d'une densité excessivement petite, répandue dans tout l'espace, même dans le vide le plus parfait, et remplissant les pores qui séparent les molécules des corps pondérables. La chaleur, la lumière, l'électricité ne sont plus alors des substances, mais les résultats de mouvements vibratoires particuliers imprimés à ce fluide universel ; de même que le son n'est pas une matière, mais un mouvement imprimé à la matière. Le fluide universel a reçu

le nom d'*éther*. Ce mot a été emprunté aux anciens, qui, du reste, n'y attachaient pas généralement le même sens que nous. Orphée l'emploie pour désigner le premier élément du monde; Anaxagore appelle l'éther le principe du feu, et Platon le qualifie de matière plus pure et plus légère que l'air.

L'éther étant répandu dans tout l'espace, on voit qu'on ne peut reconnaître par l'expérience s'il est pesant. Nous sommes vis-à-vis de cette substance comme vis-à-vis de l'air que nous chercherions à peser au moyen de vases criblés de trous. Il est cependant probable que l'éther est pesant, c'est-à-dire qu'il obéit à l'attraction de la matière pondérable; car les modifications qu'éprouve un rayon de lumière en traversant un cristal transparent à élasticité inégale, montrent que l'éther accumulé autour de ses molécules possède une densité différente dans les diverses parties de ce cristal; ce que l'on attribue à l'attraction variable des groupes moléculaires.

L'hypothèse de l'éther, à cause de sa grande simplicité et de la facilité avec laquelle elle explique la plupart des phénomènes, a été généralement adoptée. C'est surtout dans l'étude de la lumière qu'on a pu en suivre avec détail toutes les conséquences et l'on a toujours trouvé l'accord le plus satisfaisant entre les déductions théoriques et les résultats de l'expérience.

Dans ce livre et les suivants, nous allons nous occuper des phénomènes de la *chaleur*, de l'*électricité* et de la *lumière*, et nous mettrons en regard, toutes les fois que l'occasion s'en présentera, les faits et les lois observés, avec les explications théoriques qui s'y rapportent.

CHAPITRE PREMIER.

DE LA CHALEUR EN GÉNÉRAL.

MESURE DES TEMPÉRATURES.

§ 1. — DE LA NATURE DE LA CHALEUR.

684. Effets généraux de la chaleur. — Les impressions de chaud et de froid sont familières à chacun de nous. La cause qui les détermine par son action plus ou moins intense a reçu le nom de *chaleur*. La chaleur est un agent universel, répandu dans toute la nature, remplissant l'espace qu'il traverse dans

tous les sens, après avoir jailli du soleil et des étoiles; il semble fait pour animer l'univers; sa présence est nécessaire à l'existence des êtres organisés. Les pays du globe dans lesquels son influence ne se fait sentir que faiblement, languissent dans un état de désolation frappant; le voyageur n'y rencontre que des amas de neiges et de glaces, et çà et là quelques végétaux inférieurs, et quelques animaux privilégiés errant au milieu de solitudes glacées, comme pour attester la puissance de fécondité de la nature.

Les êtres organisés ne sont pas les seuls à ressentir l'influence de la chaleur; les corps bruts eux-mêmes cèdent à son action; elle les décompose, en séparant les molécules d'espèce différente réunies dans les combinaisons, ou bien elle détermine l'union de ces molécules, qui, sans son intervention, resteraient mélangées sans se combiner; effets que la chimie étudie tout particulièrement. La chaleur peut encore changer l'état des corps : sous son influence les corps solides se liquéfient, et les liquides passent à l'état de gaz; et quand elle ne produit pas des effets aussi intenses, elle agit encore pour écarter les molécules des corps, tandis que ces molécules se rapprochent quand son action diminue d'intensité. Enfin, c'est par l'effet de la chaleur que les molécules sont retenues à distance les unes des autres, et ne peuvent venir jusqu'au contact en obéissant à la force de cohésion (I, 150).

L'industrie tire chaque jour parti des effets variés que produit la chaleur, et les progrès d'une multitude d'arts sont fondés sur la connaissance de ses propriétés; aussi, les hommes qui ont ignoré l'usage du feu, sont-ils restés ignorants et sauvages. Certains peuples, saisis d'admiration pour les effets merveilleux produits par cet agent, soit sur les êtres vivants, soit sur les corps bruts exposés à son action, l'ont adoré sous le nom de *feu*.

685. De la nature de la chaleur. — La nature de la chaleur est encore un mystère pour la science. Il résulte de l'expérience, qu'elle peut se propager de deux manières différentes : 1° à distance, à travers l'espace vide ou rempli par certains milieux qui ne s'opposent pas à son passage, comme l'air à travers lequel nous arrive la chaleur du soleil ou celle qui émane d'un foyer allumé; 2° à travers la substance même des corps de molécule à molécule, comme lorsque la chaleur de l'eau bouillante versée dans un vase, en traverse les parois pour arriver à sa surface extérieure. La chaleur est donc un agent très subtil, de plus très élastique, comme le prouve la facilité avec laquelle elle se réfléchit sur les corps polis.

Quand la chaleur pénètre et échauffe les corps, elle n'augmente pas leur poids; c'est pourquoi on l'a qualifiée de *fluide impondérable*. On a fait un grand nombre d'expériences à ce sujet. Boyle ayant trouvé que des métaux, après avoir été calcinés, avaient augmenté de poids, supposait que l'agent de la chaleur était pesant; mais nous savons aujourd'hui que l'augmentation de poids était due à l'absorption de l'oxygène de l'air, qui se combine avec les parties superficielles de ces métaux. Nollet avait, dès l'abord, soupçonné quelque cause d'erreur de ce genre. Boerhaave avait trouvé qu'un boulet

de fer rouge ne pesait pas plus que lorsqu'il était froid ; mais, comme le mouvement ascendant de l'air dilaté autour de ce corps devait soulever la balance, l'expérience n'était pas concluante. Lavoisier, ayant renfermé une certaine quantité d'eau dans un matras en verre scellé hermétiquement, lui trouva toujours le même poids, quand l'eau était congelée et quand elle était à l'état naturel ; or, quand l'eau se congèle elle abandonne une quantité énorme de chaleur, dont nous donnerons une idée en disant qu'elle ferait rougir à blanc un poids d'or égal ; et cette quantité de chaleur n'avait pas de poids appréciable. Rumfort, Guiton de Morveau ont répété cette expérience, et sont arrivés à la même conclusion.

Nous citerons encore l'expérience suivante, faite en 1811 : on réunit deux cornues, en engageant le col de l'une dans celui de l'autre, et l'on ferme hermétiquement les joints. L'une des cornues contient de l'acide sulfurique concentré, et l'autre de l'eau. On pèse exactement cet appareil, puis on mélange peu à peu les deux liquides. Il se dégage alors une énorme quantité de chaleur, qui se dissipe bientôt, de manière que l'appareil redevient aussi froid qu'avant de faire le mélange. Cependant la déperdition de cette énorme quantité de chaleur ne modifie pas le poids de l'appareil d'une manière appréciable. L'expérience n'a donc pu faire constater de poids dans la chaleur.

686. Sources de chaleur. — La chaleur qui est impondérable ne peut cependant se manifester sans l'intervention de la matière pondérable : en effet, tout effet calorifique provient d'un corps pondérable d'où la chaleur émane, comme le soleil, les corps en combustion. La chaleur ne peut se produire dans le vide, et quand on l'y rencontre, c'est qu'elle y a été lancée par certains corps. La chaleur ne peut donc exister dans le vide qu'à l'état de mouvement ; on ne la connaît pas isolée et en repos.

Les corps d'où émane la chaleur se nomment *sources de chaleur*. Il y a des sources permanentes comme le soleil, les étoiles. Il en est d'autres que l'on peut faire naître à volonté ; par exemple, en frottant vivement deux corps l'un contre l'autre, en les comprimant fortement, ou en les soumettant à des chocs réitérés, on fait apparaître une grande quantité de chaleur. En général, il y a dégagement de chaleur, toutes les fois que les molécules d'un corps sont déplacées les unes par rapport aux autres. C'est surtout dans les actions chimiques qu'il se dégage de grandes quantités de chaleur ; les molécules éprouvant alors des mouvements relatifs considérables. C'est aussi aux actions chimiques, et particulièrement à la combustion, que l'industrie demande les quantités énormes de chaleur dont elle a besoin. Nous étudierons plus tard avec détails les conditions de la production de la chaleur.

687. De la chaleur dans les corps. — Les corps chauds envoient de la chaleur en tous sens, et cette chaleur peut être reçue par les corps plus froids qui sont à proximité. Ces corps présentent des aptitudes différentes à laisser passer la chaleur par leur surface, soit pour entrer, soit pour sortir ; à la laisser

pénétrer dans la profondeur de leur masse; à en contenir des quantités plus ou moins grandes.

La chaleur que contiennent les corps se divise en deux parties: l'une, qui reste appréciable à nos organes, en produisant la sensation de chaleur, et est toujours prête à s'échapper en présence de corps plus froids; on la nomme *chaleur sensible*. L'autre, qui ne produit pas d'effets apparents, qui reste enfouie dans les espaces inter-moléculaires; on la nomme *chaleur latente*. Quand un corps fond sous l'action du feu, une quantité énorme de chaleur devient *latente*, et c'est précisément dans le phénomène de la fusion des corps que l'on a distingué pour la première fois la chaleur latente.

Nous voyons par ce qui précède, que l'on peut considérer la chaleur, d'après sa manière d'être : 1° hors des corps et en mouvement rapide à travers l'espace, auquel cas elle constitue ce que l'on nomme la *chaleur rayonnante*; 2° dans les corps, où elle peut être en mouvement en se propageant de molécule à molécule à travers leur substance; ou bien en repos, soit à l'état latent, soit à l'état de chaleur sensible. L'état d'équilibre du calorique sensible, dans lequel le corps ne perd ni ne gagne de chaleur, constitue la *température* de ce corps.

688. Hypothèses sur la nature de la chaleur. — Les anciens, qui ne connaissaient que les effets les plus communs de la chaleur, n'ont eu sur sa nature que des idées vagues et erronées; il est même assez difficile de démêler leur véritable pensée au milieu des explications confuses qu'ils ont données. Epicure et Démocrite regardent la chaleur comme une matière particulière; c'est la substance du feu même, réduite en atomes. Homberg, Lemery, Sgravesande et principalement Boerhaave, la considèrent comme une substance disposée en corpuscules flottant dans tout l'espace, et ne se manifestant que dans certaines circonstances favorables; par exemple, quand ces corpuscules sont rassemblés, comme cela a lieu quand on frotte deux corps, ou quand ils sont disposés en traînées ou en *rayons*, de manière que, poussés à la suite les uns des autres, ils viennent choquer les corps exposés à leur action. Bacon, Boyle, Descartes, Newton ne considèrent plus la chaleur comme une matière, mais, à ce qu'il semble, comme un mouvement vibratoire des molécules des corps.

Systèmes de l'émission et des ondulations. — Aujourd'hui il ne reste plus que deux systémes en présence: dans le plus ancien, désigné sous le nom de *système de l'émission*, et adopté spécialement par les chimistes de la fin du dernier siécle, la chaleur est attribuée à une substance particulière impondérable, qui est lancée par les corps chauds avec une grande vitesse, se réfléchit sur les surfaces des corps qu'elle rencontre, ou les pénétre et se combine avec leurs molécules en proportions diverses. Les parties de cette substance se repoussent mutuellement; lors de la réforme de la nomenclature chimique, on lui a donné le nom de *calorique*.

Dans la seconde hypothèse, développée par Bernouilli, Euler et surtout par

Rumfort, et connue sous le nom de *système des ondulations*, la chaleur n'est pas une substance; c'est le résultat de mouvements vibratoires excités dans l'*éther* (683) par les molécules des corps chauds, qui sont elles-mêmes dans un état vibratoire particulier. Ces mouvements se propagent à travers l'éther avec une vitesse prodigieuse, et se communiquent aux molécules des corps plus froids, qui alors sont échauffés. Dans ce système, on conçoit facilement pourquoi la chaleur n'augmente pas le poids des corps, et comment elle se dégage quand on ébranle leurs molécules par le frottement, ou par les autres moyens. Ce système correspond à un système semblable adopté généralement pour expliquer les phénomènes lumineux. Or, les lois, suivant lesquelles la chaleur se transmet d'un corps à un autre, sont exactement les mêmes que pour la lumière. Si donc le système des ondulations doit être adopté de préférence à tout autre, pour les phénomènes lumineux (et nous verrons dans l'optique qu'il en est ainsi, à cause de la concordance parfaite des résultats de la théorie avec ceux de l'expérience), on doit aussi l'adopter pour expliquer les phénomènes de la propagation de la chaleur. Quant aux effets que la chaleur produit sur les corps, ils n'ont pas d'analogues en optique. Ces phénomènes restent encore incomplètement expliqués; nous verrons cependant qu'on peut en rendre compte, d'une manière générale, dans le système des ondulations.

L'étude des phénomènes de la chaleur, et la recherche expérimentale de leurs lois, peut être poursuivie sans qu'on ait besoin d'adopter l'un ou l'autre des deux systèmes en présence; c'est ainsi que nous procéderons. Après avoir fait connaître les moyens de mesurer les températures, nous nous occuperons de la propagation de la chaleur, soit à travers l'espace, soit à travers la masse même des corps; puis de l'action de la chaleur sur les corps, pour les dilater ou changer leur état, et des quantités de chaleur nécessaires pour produire ces divers effets. Nous exposerons ensuite la théorie des vapeurs; nous examinerons les différents moyens de produire de la chaleur, et nous étudierons enfin les phénomènes météorologiques dans lesquels elle joue le principal rôle.

§ 2. — MESURE DES TEMPÉRATURES.

I. De la température en général.

689. Définition de la température. — La *température* d'un corps est un état d'équilibre particulier, dans lequel le corps ne perd ni ne gagne de chaleur, et auquel correspond un certain volume déterminé de ce corps. Si l'on pouvait évaluer à chaque instant le volume du corps, on aurait, en comparant successivement ce volume à lui-même, un moyen d'apprécier les températures successives qu'il possède. On fait varier la température d'un corps, en lui

ajoutant ou en lui retirant une certaine quantité de chaleur sensible. La température d'un espace vide, qui ne peut posséder de chaleur par lui-même (686), est produite par celle qui le traverse, après avoir été lancée par les corps environnants; c'est la température que prendrait un corps plongé dans cet espace. C'est ainsi que la température d'un point des espaces célestes provient de la chaleur qui passe par ce point, aprés avoir jailli du soleil et des étoiles.

Plusieurs corps sont à la *même température* quand, plongés dans le même milieu, ils ne perdent ni ne gagnent de chaleur. Il ne faudrait pas croire qu'on pût constater cette égalité de température, en touchant successivement ces corps avec la main, et comparant les sensations éprouvées; car, pour qu'il y ait sensation, il faut que la température de la main soit différente de celle du corps touché, et alors il n'y a plus équilibre de chaleur, et l'effet produit dépend de la facilité avec laquelle cet agent peut se transporter de l'intérieur du corps à sa surface, et de celle-ci à la main, ou suivre la route inverse; facilité qui dépend de la nature de la substance.

On ne peut pas davantage reconnaître avec la main le degré de température d'un corps; l'effet dépendant de l'état momentané de l'organe, de sorte qu'un même corps peut paraître chaud ou froid, suivant que la main est froide ou chaude. Par exemple, si, après avoir plongé la main droite dans de l'eau glacée et la main gauche dans de l'eau brûlante, on les plonge en même temps dans de l'eau tiède, la main droite éprouvera une impression de chaleur, et la main gauche une impression de froid. Les impressions de chaud et de froid sont donc relatives; un corps paraît chaud quand il cède de la chaleur à nos organes, et froid, quand il leur en enlève; et cela dépend de l'état des organes.

690. Dilatation. — Quand plusieurs corps différents sont placés dans un espace dont la température est plus basse ou plus élevée que la leur, ils perdent ou gagnent de la chaleur jusqu'à ce que la température soit partout la même. En même temps leur volume change; il augmente si la température s'élève, et diminue quand il y a refroidissement. L'augmentation de volume par la chaleur se nomme *dilatation*. Pour mettre en évidence la dilatation d'une barre suivant sa longueur, on se sert du *pyromètre à levier* ou *à cadran* (*fig.* 524). La barre *ab* est supportée par deux colonnes dont elle traverse la partie supérieure. Fixée invariablement en *b*, par la vis de pression *v*, elle peut glisser en *a* sans éprouver de résistance. L'extrémité *a* s'appuie sur le petit bras d'un levier coudé *aoc*, dont la grande branche *c* peut parcourir un arc divisé. Si l'on échauffe la barre *ab* au moyen d'une lampe à alcool *m*, elle se dilate, l'extrémité *a* pousse le levier *ao*, et fait monter le bras *oc*. Quand on éteint la lampe à alcool, la barre se contracte et le bras *oc* redescend par son propre poids. Pour prouver la dilatation dans tous les sens, on se sert du pyromètre de Sgravesande, déjà décrit (I, 35). La dilatation des liquides et des gaz se montre au moyen de tubes soudés à des réservoirs remplis de liquide ou de gaz, comme nous l'avons déjà expliqué (I, 35).

L'expérience montre que les variations de volume ne sont pas les mêmes pour tous les corps, en supposant qu'ils partent tous de la même température et qu'on les échauffe également. Ainsi, si l'élévation de température était telle que du mercure augmentât de $\frac{1}{5550}$ de son volume, du cuivre augmenterait du $\frac{1}{584}$; du verre, de $\frac{1}{1142}$; de l'air, de $\frac{1}{272}$.

Capacité pour la chaleur. — De plus, il ne faut pas la même *quantité* de chaleur pour élever également la température de différentes substances, à poids égal. Si, par exemple, on plonge dans l'eau, un même poids de fer et d'antimoine pris à une même température plus basse que celle de l'eau, les deux corps s'échauffent aux dépens de la chaleur du liquide, qui se refroidit,

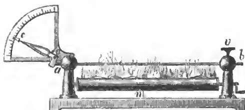


Fig. 524.

jusqu'à ce que la température des trois substances soit la même. Le fer prend, dans cette expérience, les $\frac{2}{3}$ de la chaleur enlevée à l'eau, et l'antimoine ne prend que l'autre tiers. Nous verrons plus tard comment on peut constater ces résultats. On appelle *capacité des corps pour la chaleur*, la faculté qu'ils possèdent d'absorber et de contenir une quantité plus ou moins grande de chaleur, quand on élève leur température dans une proportion déterminée. On peut comparer les corps qui ont même température, à des vases qui contiennent un liquide s'élevant au même niveau; ces vases peuvent contenir des quantités très différentes de liquide, et pour élever leur niveau d'une même quantité, il faut aussi en ajouter des quantités différentes, suivant leur diamètre.

691. Mesure des températures. — Pour évaluer les températures, on se sert des effets que la chaleur produit sur les corps. L'effet le plus général est la dilatation; c'est aussi le plus facile à observer. C'est pourquoi la plupart des instruments destinés à mesurer les températures sont basés sur ce phénomène. Les solides se dilatent très peu; on ne les emploie que pour les très hautes températures. Les gaz se dilatent beaucoup, ce qui donnerait aux instruments des dimensions embarrassantes; on ne les emploie généralement que pour les faibles variations de température. Cependant on en fait aussi usage pour celles qui sont très élevées, parce qu'ils ne peuvent plus changer d'état. Pour les températures modérées, on se sert des liquides, qui se dilatent plus que les solides, et dont la fluidité se prête facilement à la mesure des variations de volume.

Thermomètre. — Les instruments destinés à mesurer les températures se nomment *thermomètres*. Le thermomètre à liquide consiste essentiellement en un réservoir en verre auquel est adapté un tube capillaire; le liquide remplit le réservoir et une partie du tube. Quand le liquide se dilate, l'augmentation de volume se porte toute entière dans le tube, dont le niveau s'élève d'autant plus que son diamètre est plus petit par rapport à la capacité du réservoir. Une division, tracée sur le tube, permet de reconnaître facilement les déplacements du niveau.

Quand on veut prendre la température d'un milieu, on plonge cet instrument, dans ce milieu jusqu'à ce que la position du niveau ne varie plus; et la température indiquée par le thermomètre est la même que celle du milieu et des corps qui y sont plongés. S'il s'agit d'un corps solide, on creuse une cavité dans ce corps, on la remplit de mercure et on y plonge l'instrument.

Dans cette manière d'opérer, il y a une cause d'erreur provenant de ce que, la température du thermomètre étant primitivement différente de celle du corps, il lui enlève ou lui cède de la chaleur; la température indiquée est donc celle qui existe après la modification. Quand la température du corps se rétablit à mesure qu'on la change, cet inconvénient n'existe pas. Dans tout autre cas, il faut employer des thermomètres dont la masse soit insensible, ou au moins très petite, par rapport à celle du corps; c'est ordinairement ce qui a lieu. Quand il n'en est pas ainsi, on fait une correction par une méthode que nous ferons connaître plus tard.

Les liquides que l'on emploie ordinairement dans la construction des thermomètres sont le mercure et l'alcool.

II. Des thermomètres.

692. THERMOMÈTRE A MERCURE. — Pour construire un thermomètre à mercure, on choisit un tube capillaire qui soit bien cylindrique, ce qui se reconnaît en y faisant passer une petite colonne de mercure qui doit conserver partout la même longueur. On souffle une boule à l'extrémité de ce tube, ou bien on y soude, à la lampe d'émailleur, un réservoir cylindrique en verre.

Pour introduire le mercure dans ce réservoir, il faut employer des artifices particuliers, parce que, le tube étant capillaire, l'air logé dans l'intérieur empêche le liquide d'y descendre. On soude alors à l'extrémité *c* (*fig.* 525), un tube plus gros *ac*, servant d'entonnoir; on place l'appareil verticalement, et l'on y verse du mercure bien pur. L'air contenu dans le tube supporte la pression atmosphérique augmentée du poids de la colonne *ac*, il cède, et le mercure descend dans le tube jusqu'en *b*, puis tombe dans le réservoir, jusqu'à ce que l'air qui s'y trouve ait acquis par la diminution de volume, un excès de pression équivalent à la colonne de mercure *ab*. Si alors on incline l'instrument

dans la position *ba'*, l'air du réservoir ne supporte plus, en sus de la pression atmosphérique, que la pression d'une colonne égale à *c'b'* ; il refoule le mercure dans le tube jusqu'en *c'*, et sort en partie à travers le mercure *c'a'*. Si l'on redresse le tube, l'air resté dans l'intérieur cède, et une certaine quantité de mercure pénètre encore dans l'appareil. Inclinant de nouveau le tube, on fait sortir une nouvelle portion d'air. En continuant ainsi, on parvient à remplir presque entièrement le réservoir, mais non totalement, parce que le peu d'air qui reste à la fin, ne peut refouler le mercure jusqu'en *c'*, l'augmentation de volume qu'il éprouve dans le tube étant alors relativement très grande.

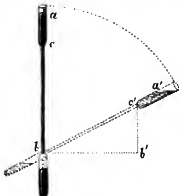


Fig. 525.

On achève de remplir le thermomètre, en faisant bouillir le mercure. Pour cela, on place l'instrument sur une grille inclinée *ac* (*fig.* 526); on met des charbons ardents au-dessous du réservoir, et quelques-uns sous l'entonnoir *a*, et le mercure entre bientôt en ébullition. Quand on laisse ensuite refroidir l'appareil, les vapeurs de mercure se condensent, et le liquide chaud de l'entonnoir, poussé par la pression atmosphérique, remplit totalement l'instrument. De cette manière on purge l'intérieur, de l'humidité et de l'air qui adhèrent aux parois du verre.

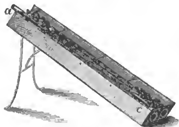


Fig. 526.

Le thermomètre une fois rempli, il faut en régler la course, c'est-à-dire en faire sortir une quantité de mercure telle que le niveau ait la faculté de se déplacer entre certaines limites, sans atteindre l'extrémité du tube, ni l'origine du réservoir. Pour faire sortir du mercure, on chauffe le réservoir, et, par tâtonnement, on arrive à en laisser la quantité convenable. On ferme ensuite le thermomètre pendant qu'il est rempli par le mercure dilaté, en fondant à la lampe d'émailleur ou au chalumeau, son extrémité qu'on a eu soin d'effiler préalablement. On évite ainsi de laisser de l'air dans l'instrument; ce fluide aurait l'inconvénient de fausser les indications; car, lorsque la colonne de mercure arriverait près de l'extrémité du tube, l'air comprimé, réagissant par son élasticité, ferait distendre le réservoir. Quelquefois on souffle au-dessous de la pointe effilée, une petite ampoule, *a* (*fig.* 533), dans laquelle le mercure se rend quand la température est trop élevée, ce qui évite la rupture de

l'instrument; avec cette addition, on laisse quelquefois de l'air au-dessus du mercure. Il peut arriver alors que cet air divise la colonne de mercure, lorsque l'instrument éprouve des secousses. Quand cet accident arrive, on attache le thermomètre à une ficelle, et on le fait tourner comme une fronde; la force centrifuge pousse le mercure vers le réservoir, et l'air qui divise la colonne revient vers l'extrémité opposée.

693. Graduation du thermomètre. — Il reste à appliquer au tube une graduation, qui doit être établie suivant des règles fixes, afin que tous les thermomètres soient comparables entre eux, c'est-à-dire donnent les mêmes indications dans les mêmes circonstances. Pour cela, on a adopté deux températures fixes, que l'on marque sur le tube, et l'on divise ensuite l'intervalle entre les deux points marqués, en un nombre déterminé de parties égales. Les températures adoptées sont celle de la glace fondante et celle de l'eau bouillante

Point de la glace fondante. — Les académiciens de Florence avaient reconnu que la glace conserve une température invariable, pendant tout le temps de sa fusion; ce que l'on peut reconnaître en y plongeant un thermomètre, dont on voit le niveau se tenir toujours au même point dans quelque circonstance que l'on fasse l'expérience, pourvu que la glace soit bien pure. Pour marquer le point de la glace fondante sur le thermomètre, il faut employer un vase assez profond pour que l'instrument soit entièrement entouré de glace (*fig.* 527). Celle-ci doit être pilée très fin, pour que l'eau qui la mouille remplisse les interstices, et que le thermomètre soit partout en contact avec un milieu ayant la même température. Comme l'eau de fusion peut prendre à la longue une température plus élevée que celle de la glace, on la fait écouler à mesure qu'elle s'accumule, par un trou pratiqué au fond du vase. Quand le niveau du mercure ne varie plus, on le marque sur le tube, que l'on soulève hors de la glace, en ayant soin d'observer le sommet de la colonne dans une direction bien horizontale, pour éviter l'erreur provenant de l'épaisseur des parois. Pour cela, on se sert d'un cathétomètre, ou d'une petite lunette, mobile sur un support et disposée comme celle de cet instrument. On se sert encore d'un petit coulant, dont on amène le bord à paraître tangent au ménisque qui termine la colonne de mercure.



Fig. 527.

Point d'ébullition. — Amontons a remarqué que la température de l'eau bouillante reste la même quelle que soit la violence de l'ébullition. Cette remarque, qui paraît avoir été aussi faite vers la même époque par Renaldini, de Padoue, a fourni le second point fixe du thermomètre. Mais il faut observer que la température de l'eau bouillante n'est pas aussi invariable que celle de la glace fondante; elle peut changer d'une expérience à une autre, car elle dépend de la pression atmosphérique, et augmente en même temps qu'elle. On est

convenu de prendre pour point fixe, la température de l'ébullition de l'eau sous la pression de $0^m,76$. De plus, Gay-Lussac ayant reconnu que la nature du vase a aussi une légère influence sur cette température, qui est plus élevée dans un vase de verre que dans un vase métallique, on est convenu de se servir d'un vase de métal. On opère ordinairement avec une petite chaudière en cuivre *nn* (*fig.* 528) contenant de l'eau distillée. On la ferme au moyen d'un couvercle surmonté d'un tube qui porte à son extrémité supérieure deux ouvertures latérales pour laisser échapper librement la vapeur. Le thermomètre *t* est soutenu par un bouchon, de manière à ne plonger que très peu dans l'eau, parce que la pression étant plus forte au fond du vase que près de la surface, à cause du poids de l'eau, la température de l'ébullition y est plus élevée. Le reste du thermomètre est enveloppé par la vapeur, qui a la même température que l'eau bouillante. On retire de temps en temps le tube, qui peut glisser à travers le bouchon qui le soutient, et on voit bientôt que le niveau du mercure ne change plus ; on attend un quart d'heure, pour plus de sûreté, et l'on marque le point où se tient ce niveau, en prenant toutes les précautions employées pour marquer le point de la glace fondante.

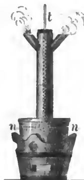


Fig. 528.

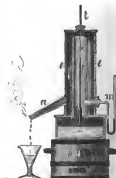


Fig. 529.

L'appareil (*fig.* 528) ne donne pas des résultats très exacts : la température du cylindre étant moindre que celle de la vapeur, à cause du contact de l'air extérieur, le thermomètre rayonne vers cette enveloppe, et sa température peut être un peu trop basse. Pour éviter cette cause d'erreur, M. Regnault se sert de l'appareil (*fig.* 529), qui porte une seconde enveloppe *ee*, que la vapeur est forcée de parcourir avant de s'échapper par l'ouverture *a*. Un manomètre à eau *m*, sert à constater que la vapeur possède à chaque instant la même pression que l'air extérieur. On rend l'expérience plus sûre encore en faisant en sorte qu'aucune partie du thermomètre ne plonge dans l'eau. Rudberg a reconnu que la température de la vapeur, pour une même pression extérieure, reste alors la même, quelle que soit la nature du vase, et lorsque l'eau n'est pas distillée et renferme quelques petites quantités de sels en dissolution.

Après qu'on a marqué les points fixes, on divise l'espace qui les sépare en 100 parties d'égale capacité, qui sont aussi d'égale longueur, si le tube est partout de même diamètre. On se sert, dans ce cas, de la machine à diviser (I, 21).

On marque zéro au point de la fusion de la glace, 100 au point d'ébullition de l'eau, et l'on porte des divisions de même grandeur au-delà de 100 et au-dessous du zéro, en ayant soin de faire augmenter les numéros en montant et en descendant, à partir de ce dernier point. L'échelle thermométrique ainsi établie se nomme *échelle centigrade* ou *échelle centésimale*.

694. Correction du point d'ébullition. — Quand la pression atmosphérique n'est pas exactement de 0m, 76 pendant l'opération, il faut faire une correction, indiquée par Fahrenheit. Wollaston a constaté par l'expérience qu'une différence de 27mm de pression au-dessus ou au-dessous de 760mm, élève ou abaisse de 1° centigrade la température de l'ébullition. Pour les faibles variations de la pression atmosphérique, on peut admettre qu'il y a proportionnalité dans ces effets. Si donc la pression atmosphérique est $760^{mm} \pm n$, on posera $27^{mm} : n^{mm} = 1° : x°$; et au lieu de diviser l'intervalle entre les points fixes en 100 parties égales, on le divisera en $100 \pm x$, ou $100 \pm \frac{n}{27}$.

Quand on veut une plus grande précision, on consulte des tables dont nous parlerons plus tard, dans lesquelles se trouvent indiquées, en dixièmes de degré, les températures de l'ébullition de l'eau, correspondantes aux différentes pressions atmosphériques.



Fig. 530.



Fig. 531.

695. Degrés de température. — Chaque division se nomme *un degré centigrade* : c'est l'*unité de température*. On prend donc pour unité de température, la centième partie de la dilatation du mercure *dans le verre*, depuis la température de la glace fondante jusqu'à celle de l'eau bouillante. Nous voyons que les températures indiquées ainsi ne sont pas absolues ; ce ne sont que des différences, puisque le point de départ a été choisi arbitrairement. Quand on dit d'une température qu'elle est double, triple d'une autre, on n'énonce donc qu'un résultat numérique et non un résultat physique, et l'on n'exprime pas qu'il y a deux fois, trois fois plus de chaleur dans le corps.

L'échelle du thermomètre est tracée, tantôt sur une plaque de verre, d'ardoise, de métal, sur laquelle on fixe le tube T (*fig.* 530), tantôt sur une bande de papier renfermée dans un gros tube de verre fixé au thermomètre, qui prend alors le nom de *thermomètre à chemise* C (*fig.* 531), et sert principalement pour les liquides. L'échelle des thermomètres de précision est toujours tracée sur le tube même de l'instrument. Les températures plus basses que 0° s'indiquent en mettant le signe (—) devant les nombres qui les expriment.

696. Différentes échelles thermométriques. — L'échelle centigrade est due à Celsius; on en a adopté d'autres qu'il faut connaître. Dans l'échelle de Réaumur, on partage l'intervalle entre les points fixes en 80 parties égales, de sorte que les degrés du *thermomètre de Réaumur* sont plus grands que ceux du thermomètre centigrade. En Angleterre et en Allemagne, on se sert principalement de l'*échelle de Fahrenheit* : l'intervalle entre les points fixes est divisé en 180 parties; ces divisions sont portées au-dessous du point de la glace fondante, et à la 32ᵉ on marque 0°; de manière que, au point de la glace fondante se trouve 32°, et à l'eau bouillante $32+180=212°$. Ce point de départ a été choisi par Fahrenheit, parce qu'il correspondait au froid le plus vif, qu'il eût observé à Dantzick [1]. Il y a encore une quatrième échelle, usitée en Russie, celle de Delisle : l'intervalle des points fixes est partagé en 150 parties, et le zéro est à l'eau bouillante, de manière que le point de la glace fondante porte le numéro 150.

On voit qu'il est essentiel, quand on énonce une température, d'indiquer en même temps de quelle échelle on s'est servi. L'échelle centésimale a été spécialement adoptée par les savants Français, c'est celle que nous employons dans tout le cours de cet ouvrage. Du reste, il est facile de passer des indications données dans une des échelles, à celles qui leur correspondent dans une autre. Par exemple, soient C et R les nombres correspondants de *degrés centigrades et de degrés de Réaumur* ; on aura

$$100 : 80 = C : R; \quad \text{d'où} \quad C = R \cdot \tfrac{5}{4}, \quad \text{et} \quad R = C \cdot \tfrac{4}{5}.$$

Si l'on donne des degrés Farenheit, F, il faut commencer par en retrancher 32°, pour avoir le même point de départ, et l'on aura, pour passer, par exemple, aux degrés centigrades :

$$F - 32 : C = 180 : 100, \quad \text{d'où} \quad C = (F - 32)\,\tfrac{5}{9}, \quad \text{et} \quad F - 32 = C \cdot \tfrac{9}{5}.$$

La seconde formule donne le moyen de passer des degrés centigrades aux degrés de Fahrenheit; on voit qu'il faut ajouter 32° au nombre obtenu pour se conformer au point de départ particulier de l'échelle Fahrenheit. Si l'on fait $F = 32$, on trouve $C = 17,777$; le zéro du thermomètre de Fahrenheit est donc à 17°,77 centigrades au-dessous de la glace fondante.

Enfin, s'il s'agit de l'échelle de Delisle, soit D le nombre de degrés donné ; on le remplace par $150 - D$ pour avoir le même point de départ que pour l'échelle centigrade, et le nombre de degrés centigrades correspondant sera $C = (150 - D)\,\tfrac{2}{3}$. On aura de même le nombre $150 - D$ au moyen du nombre C, et le nombre D, en retranchant de 150, la quantité $150 - D$.

[1] Fahrenheit obtenait d'abord son point de départ, au moyen d'un mélange de glace et de sel ammoniac, et ce n'est que plus tard qu'on a reconnu que la température de la glace fondante correspondait à 32°.

697. Thermomètre de précision. — Division des tubes. — Quand on veut construire un thermomètre très précis, la division du tube en parties d'égale capacité demande des précautions particulières. Après avoir choisi un tube aussi bien calibré que possible, on y introduit une colonne de mercure *mn* (*fig.* 532), dont on marque sur le tube les extrémités *m* et *n*; on la pousse ensuite en *n'm'*, et on marque les points *n'* et *m'*. Les volumes compris dans les longueurs *mn*, *m'n'* sont évidemment égaux. Si maintenant la colonne de mercure a été choisie assez longue pour que la distance *mm'* soit très petite, on pourra regarder le tube comme parfaitement cylindrique dans cet espace; et en divisant la longueur *mm'* en deux parties égales, le point de division *o* partagera le volume *nn'* en deux portions aussi égales. On divisera de même chaque moitié *on*, *on'* en deux parties d'égale capacité, et ainsi de suite jusqu'à ce qu'on obtienne des subdivisions assez petites pour qu'on puisse les diviser en parties d'égale longueur qui correspondent en même temps à des volumes égaux. Ce procédé est de Gay-Lussac. M. Despretz en a imaginé un autre, qui consiste à faire mouvoir une petite colonne de mercure dans le tube, de manière que son extrémité de droite vienne prendre la place qu'occupait celle de gauche, et à marquer dans chaque position les extrémités. Pour faire mouvoir la colonne de mercure, on imprime des secousses au tube, ou bien on attache à une extrémité une petite vessie que l'on comprime plus ou moins.



Fig. 532.

M. Regnault a apporté à ce procédé des perfectionnements qui augmentent beaucoup le degré d'exactitude [1] : le tube, choisi avec soin et bien propre en dedans [2], est placé sur la machine à diviser (I, 21), de manière à pouvoir tourner bien exactement sur lui-même. Une petite lunette à réticule, fixée au chariot qui porte le burin ou tracelet, sert à déterminer exactement les extrémités de la colonne de mercure contenue dans le tube. On prend note des positions de la tête de la vis quand on vise à ces extrémités, que l'on marque avec un pinceau fin. On fait ensuite marcher la colonne de manière que son extrémité de droite coïncide avec le point qu'occupait celle de gauche, on vise ses deux extrémités avec la lunette transportée de l'une à l'autre par le mouvement de la vis, on les marque sur le tube, et l'on prend note du nombre de tours, et ainsi de suite, jusqu'à ce que le tube soit entièrement divisé. On le recouvre ensuite d'un vernis de graveur, qui est assez transparent pour laisser voir les marques faites au pinceau, et l'on divise l'intervalle entre ces marques en un nombre déterminé de parties égales, en portant d'abord le tracelet sur l'une

[1] La méthode de M. Regnault a été exposée par M. I. Pierre dans une note insérée aux *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. V, p. 428.

[2] Quand le tube n'est pas trop fin, on y fait passer de l'acide nitrique pur et concentré, puis de l'eau distillée. Cette opération devient difficile quand le tube est très capillaire.

des marques, et plaçant la tête de la vis dans la position qu'elle avait lorsque cette marque a été faite, position dont on a pris note. Les traits marqués au pinceau n'ont d'autre objet que de faciliter la recherche des limites des intervalles d'égale capacité que l'on a déterminés. Le tracelet marque sur le vernis les traits de division; on trace les numéros avec une pointe, puis on expose le tube, dans une cuve en plomb, aux vapeurs de l'acide fluorhydrique. Ces vapeurs corrodent le verre, de sorte que, partout où le vernis a été rayé par le tracelet ou par la pointe, le verre est attaqué, et les traits se trouvent gravés. On vérifie ensuite la division au moyen d'une colonne de mercure que l'on fait mouvoir dans le tube, et qui doit, dans toutes les positions, contenir le même nombre de divisions.

Capacité du réservoir. — Le tube une fois divisé, on souffle une boule à son extrémité, ou bien on y soude un réservoir cylindrique dont les dimensions doivent être calculées de manière que le tube contienne le nombre de *degrés* de température que l'on désire. Pour faire ce calcul, il faut connaître la fraction de son volume à 0° dont se dilate le mercure dans le verre, pour un degré centigrade ; représentons-la par c. Nous indiquerons tout à l'heure (699) comment on obtient cette quantité. Cela posé, on cherche le volume d'une division du tube, ou, ce qui revient au même, le poids du mercure qui la remplirait. Pour cela, on pèse le tube vide, puis contenant une colonne de mercure qui s'étend dans un nombre n de divisions. La différence des pesées donne le poids p du mercure seul; alors $p : n$ est le poids du mercure qui occupe une seule division. Supposons que l'on demande que les 100° soient compris dans N divisions; le mercure qui remplirait ces N divisions pèserait $N\frac{p}{n}$, et le volume qu'il occupe est $N\frac{p}{nd}$, en appelant d le poids spécifique du mercure à la température de l'expérience. Or, ce volume représente l'augmentation que devra éprouver le mercure contenu dans le réservoir, quand la température variera de 0° à 100°. Soit v ce volume inconnu; sa dilatation entre 0° et 100° est $c \cdot v \cdot 100$; on aura donc

$$c \cdot v \cdot 100 = \frac{Np}{nd}; \qquad \text{d'où} \qquad v = \frac{Np}{100\,ndc}.$$

Si le réservoir est sphérique, on a $v = \frac{1}{6}\pi D^3$, d'où l'on conclura son diamètre D; et, s'il est cylindrique, on aura $v = \frac{1}{4}\pi D^2 h$, d'où l'on conclura approximativement sa longueur h, en se donnant son diamètre D.

Les divisions du thermomètre ainsi construit ne représentent pas des degrés, mais il est toujours facile, par la méthode que nous avons indiquée (696), de traduire les indications de cette échelle arbitraire en degrés centigrades, quand on sait combien il y a de divisions entre les deux points fixes. Ordinairement on calcule une table, dans laquelle la transformation se trouve faite d'avance pour chaque division du tube.

L'échelle des thermomètres de précision est tracée sur le tube même, comme on le voit sur la *fig.* 533. Quand on observe l'instrument, il faut, pour se mettre à l'abri des effets de parallaxe produits par l'épaisseur du tube, se servir d'une petite lunette à micromètre, dirigée perpendiculairement à la tige, et mobile sur une règle divisée. Le cathétomètre convient bien à cet usage, et, de plus, son vernier permet d'évaluer les fractions de division du tube. Il y a des thermomètres qui donnent, par ce moyen, les centièmes de degré. L'emploi d'une lunette permet en même temps d'observer de loin, ce qui donne plus de sûreté, à cause de l'influence que pourrait avoir sur la hauteur du mercure, la chaleur rayonnée par l'observateur.



Fig. 533.

698. Graduation par comparaison. — Quand on a construit un bon thermomètre étalon, on peut s'en servir pour en graduer d'autres par comparaison. Pour cela, on plonge l'étalon, avec l'instrument à graduer, dans un même bain dont on change successivement la température, en ayant soin de la maintenir constante pendant quelque temps, et l'on marque au niveau du mercure, sur l'instrument à graduer, le nombre de degrés indiqués par l'étalon. Quand on a obtenu ainsi un certain nombre de points assez rapprochés, on divise l'intervalle en parties égales. Ce moyen s'emploie principalement quand on veut des thermomètres courts et ne comprenant qu'un petit nombre de degrés, auxquels on donne de grandes dimensions, pour pouvoir en apprécier les petites fractions.

Dans la pratique, il est très difficile de conserver pendant quelque temps une température constante et uniforme dans le bain, surtout quand cette température dépasse notablement celle de l'air extérieur, malgré qu'on ait soin d'agiter vivement le liquide, d'entourer le vase de matières qui laissent passer difficilement la chaleur, et qu'on cherche à remplacer celle qui se perd, au moyen d'une lampe à alcool placée au-dessous à une distance convenable. On voit donc que, toutes les fois qu'on voudra avoir un thermomètre précis, il faudra le graduer directement.

699. Mesure de la dilatation du mercure dans le verre. — Nous allons maintenant indiquer comment on mesure la dilatation du mercure dans un tube de verre, quantité dont nous avons fait usage pour le calcul du réservoir du thermomètre. On emploie pour cela un tube thermométrique muni de son réservoir et divisé en parties d'égale capacité; on évalue le rapport entre le volume du réservoir et celui d'une division prise pour unité, par la méthode que nous avons fait connaître en parlant du piézomètre (289). Opérant ensuite comme pour construire un thermomètre, on remplit l'appareil de mercure, et on y marque les points fixes. Le nombre de divisions compris entre ces deux points

donne le nombre d'unités de volume dont s'est dilaté le mercure, de 0° à 100°. Par exemple, si ce nombre est n, et si N représente le nombre de divisions qui correspond au volume du réservoir jusqu'au point où s'arrête le niveau dans la glace fondante, on aura $n : N$, pour la dilatation rapportée à l'unité de volume, et $\frac{n}{100 . N}$, quand l'augmentation de température est de 1° seulement. Ce calcul suppose que la dilatation est la même pour chaque degré, ce qui a lieu à fort peu près, comme nous le verrons en étudiant les dilatations.



Fig. 534.

Thermomètre à poids. — On peut arriver au même résultat, au moyen d'un petit instrument sans graduation, qui peut en même temps servir de thermomètre, et que l'on nomme, à cause de cela, *thermomètre à poids*. Il consiste en un simple réservoir r (*fig.* 534), terminé par un tube capillaire recourbé en forme de crochet o. Après l'avoir pesé, on le remplit de mercure que l'on purge par l'ébullition, et on le plonge dans la glace fondante en tenant l'orifice o plongé dans du mercure pur et sec. Bientôt l'appareil est entièrement rempli de mercure à la température de 0°. On le pèse alors : soit P le poids du mercure seul ; on le plonge ensuite dans un liquide dont la température t est connue, et l'on recueille le mercure qui sort par l'effet de la dilatation. Soit p le poids de ce mercure, $P - p$ sera le poids du mercure restant. Or, ce mercure, étant supposé ramené à 0°, laissera au-dessus de lui un espace vide on, dont le volume représentera sa contraction dans le verre, en passant de $t°$ à 0°, ou sa dilatation de 0° à $t°$. Or, les volumes peuvent être représentés par les poids du mercure à 0° qui les occupent. p représente donc la dilatation dans le verre, du volume $P - p$ pour $t°$, et $\frac{p}{(P-p)t}$ représente cette dilatation pour 1° et pour l'unité de volume. On a trouvé ainsi, pour le verre ordinaire,

$$\frac{p}{(P-p)t} = \frac{1}{6480}.$$

Si l'on suppose connue la dilatation du mercure dans le verre, l'équation précédente donnera la valeur de t, supposée inconnue. On pourra donc évaluer la température au moyen d'un instrument sans graduation, et en se servant de la balance. Le thermomètre à poids a été imaginé par Dulong et Petit. Son usage repose sur une donnée numérique dont la valeur devra être établie au moyen de l'instrument lui-même, parce que cette valeur dépend de la nature du verre, comme nous allons le voir.

700. Influence du verre sur la marche des thermomètres. — Les effets que l'on observe dans le thermomètre sont une combinaison de la dilatation du mercure et de celle de l'enveloppe de verre qui le contient. Or, les différentes espèces de verre ne se dilatent pas également, et leur dilatation ne suit pas la même loi. C'est pourquoi différents thermomètres construits avec soin peuvent n'être pas d'accord, surtout pour les hautes températures. M. Regnault, auquel est due cette remarque importante, a trouvé, par exemple, les résultats suivants avec deux thermomètres en verre et en cristal :

Thermomètre en cristal....	0°	100°	191,66	254,57	282,50	315,28	340,07
Thermomètre en verre.....	0	100	190,51	251,87	279,08	310,69	333,72
Différences...........	0	0	1,15	2,70	3,42	4,59	6,35

On voit que, jusqu'à 100°, les deux instruments sont d'accord, et que les différences augmentent ensuite avec la température. M. I. Pierre a reconnu que des différences peuvent se manifester au-dessous de 100°. Par exemple, il a vu un thermomètre à réservoir en cristal être toujours en avance de quelques centièmes de degrés sur un thermomètre à réservoir de verre. Les différences ne pouvaient être dues aux erreurs de graduation ; car, ayant changé les tiges de réservoir, le résultat est resté le même, les indications étant toujours les plus élevées pour le réservoir en cristal. Il faut donc, autant que possible, former les thermomètres avec la même espèce de verre, si l'on veut qu'ils soient toujours d'accord.

701. Déplacement du zéro. — Quand on plonge dans la glace fondante un thermomètre fait depuis longtemps, on trouve que le niveau du mercure se tient un peu au-dessus du point marqué zéro ; la différence peut aller à 2°. M. Bellani, en Italie, et M. Flaugergues, en France, ont constaté ce fait d'une manière certaine, vers 1823. Jusque là on avait regardé les différences dans la position du zéro, comme provenant d'erreurs dans la graduation. On les a ensuite attribuées à la pression atmosphérique qui, ne se faisant sentir qu'à l'extérieur du réservoir, le comprimait de manière à diminuer, à la longue, sa capacité d'une manière sensible. Mais, M. Despretz ayant laissé le tube ouvert, le résultat est resté le même. M. Legrand a trouvé la véritable explication de ce phénomène dans la *trempe* qu'éprouve le verre, en se refroidissant assez rapidement après avoir été porté à la température de l'ébullition du mercure. Cette trempe augmente la capacité du réservoir, et il se fait peu à peu un travail moléculaire qui diminue insensiblement cette capacité, travail intime dont nous avons déjà eu l'occasion de parler (465). M. Legrand a constaté que ce mouvement intérieur, d'abord rapide, se continue de plus en plus lentement, pendant des mois et même des années. Si alors on porte l'instrument à la température de l'ébullition du mercure, le zéro reprend sa première position. On peut éviter le déplacement du zéro, en faisant bouillir le mercure dans un bain

d'huile, dans lequel on le laisse refroidir lentement; le vase plein d'huile se refroidissant lui-même lentement dans un bain de sable, par l'intermédiaire duquel on l'a échauffé.

M. Despretz a repris ces expériences, et a remarqué que le déplacement du zéro peut continuer pendant 4 à 5 ans. De plus, il a constaté ce fait important, que les variations de température auxquelles est soumis un thermomètre, suffisent pour déplacer le zéro, surtout quand elles s'écartent beaucoup de la moyenne. Le déplacement peut être de $\frac{1}{2}$°, quand l'instrument est porté à 100°. Un froid prolongé fait monter le zéro; la chaleur le fait descendre, et l'effet produit disparaît peu à peu. Il faut donc vérifier fréquemment la position du zéro, principalement quand le thermomètre a été exposé longtemps à des températures très basses ou très élevées. M. I. Pierre a reconnu que le cristal manifeste ces effets d'une manière plus prononcée que le verre ordinaire, et que, si l'on marque le point d'ébullition avant le point de fusion de la glace, la distance entre les points fixes change moins avec le temps. M. Regnault a obtenu des thermomètres dans lesquels le zéro ne varie pas de 0°,01 quand on les porte à 100°, en faisant souffler les boules dans des tubes de cristal, dans la verrerie même, immédiatement après qu'ils venaient d'être fabriqués.



Fig. 535.

Quand le zéro s'est élevé après que l'échelle a été établie, il suffit, pour corriger les résultats observés, d'en retrancher la fraction de degré dont le zéro s'est déplacé; car la masse de mercure n'a pas varié dans l'instrument, le réservoir seul a changé de capacité.

702. Thermomètre à réservoir intermédiaire. — La nécessité de vérifier le zéro de temps en temps, et, d'un autre côté, l'inconvénient d'avoir des thermomètres trop longs quand ils doivent servir à mesurer des températures élevées et présenter des degrés de grande étendue, a fait imaginer les thermomètres à réservoir intermédiaire. Au-dessous des divisions dont on a besoin, on ménage un réservoir R (*fig.* 535), dont on évalue le volume par rapport à celui d'une des divisions arbitraires du tube, au moyen du poids du mercure qu'il contient, comparé au poids contenu dans un certain nombre de divisions. On sait alors à combien de divisions correspond ce réservoir, et par conséquent quel numéro il faudra inscrire auprès de la première division qui le suit. On peut encore trouver par comparaison, avec un bon thermomètre étalon, le nombre de degrés qui correspond à ce réservoir, de manière à trouver ensuite la grandeur de ces degrés. Cette espèce de thermomètre, imaginée par M. Person et par M. Walferdin, chacun de leur côté, peut donner les centièmes de degrés dans le voisinage du point d'ébullition, avec une longueur de 2 décimètres, et en conservant le zéro.

703. Limites du thermomètre à mercure. — Le thermomètre à mercure ne peut servir que jusqu'à 360° au-dessus de zéro : au-delà, le mercure entrerait en ébullition et l'instrument serait brisé. Au-dessous de zéro, on ne peut s'en servir que jusqu'à 36°; à la température de —40°, le mercure se solidifie, et dès —36°, et même —35°, il éprouve des contractions irrégulières qui rendent les indications fautives. Pour les températures plus élevées que 360°, on se sert d'appareils désignés sous le nom de *pyromètres*, et dont nous parlerons après avoir étudié les lois de la dilatation des solides et des gaz. Pour les températures inférieures à —36°, on se sert principalement du *thermomètre à alcool*.

704. THERMOMÈTRE A ALCOOL. — L'alcool pur ne se congèle pas, quel que soit le froid qu'on lui fait subir ; ce liquide peut donc servir à former un thermomètre destiné aux basses températures. Pour l'introduire dans le tube, on ne peut employer le même moyen que pour le mercure, à cause de sa faible densité. On fait chauffer le réservoir, puis on le laisse refroidir pendant qu'on tient l'extrémité du tube plongée dans de l'alcool. Ce liquide monte dans le réservoir, à mesure que l'air se contracte par le refroidissement ; on fait alors bouillir, les vapeurs achèvent de chasser l'air, et l'instrument se remplit quand elles se condensent pendant que le tube plonge dans le liquide. Il reste seulement une petite bulle de gaz, qui provient de l'air dissous dans l'alcool, lequel s'en sépare en arrivant dans le réservoir échauffé (I, 376). On chasse cette bulle d'air en faisant tourner, comme une fronde, le tube thermométrique attaché à une ficelle. On règle ensuite la course, puis on ferme l'extrémité, en ayant soin de laisser de l'air, qui doit s'opposer, par sa pression, à l'ébullition de l'alcool, qui a lieu à une température peu élevée. Le liquide est coloré avec de l'orseille, pour qu'on puisse facilement distinguer la colonne capillaire ; on marque ensuite les points fixes comme pour le thermomètre à mercure. Pour les points intermédiaires, il faut graduer par comparaison, en prenant des points assez rapprochés, au moyen d'un bon thermomètre à mercure ; sans cela les instruments ne seraient pas d'accord, comme il résulte de ce qui suit.

705. Comparaison des thermomètres. — Des thermomètres construits avec des liquides différents, et gradués indépendamment les uns des autres, ne se trouvent pas d'accord quand on les expose à la même température. Par exemple, Deluc a trouvé les résultats suivants, en degrés Réaumur, avec des thermomètres remplis de mercure, d'huile d'olive, d'alcool et d'eau :

Mercure.........	—10°	—5°	0°	20°	40°	60°	80°
Huile.........	»	»	0	19,3	39,2	59,3	80
Alcool.........	—7,7	—3,9	0	16,5	35,1	56,2	80
Eau............	»	»	0	4,1	20,5	45,8	80

On voit qu'il n'y a accord que pour les points fixes. Dès lors il se présente

une question importante, celle de savoir s'il y a un liquide qui indique des nombres de degrés proportionnels aux quantités de chaleur ajoutées, et quel est ce liquide. Cette question, soulevée par Taylor, en 1723, fut étudiée par lui en mêlant des poids égaux d'eau froide et d'eau chaude. La température du mélange doit être évidemment la moyenne des températures t et t' des deux masses égales d'eau, c'est-à-dire $\frac{1}{2}(t+t')$; car la chaleur gagnée par l'eau froide est précisément celle que perd l'eau chaude [1], et un thermomètre comparable avec lui-même sera celui qui indiquera précisément cette température $\frac{1}{2}(t+t')$. Or, ces expériences, répétées par Black, Deluc, Crawfort, ont prouvé que le thermomètre à mercure remplit sensiblement cette condition jusqu'à 200°, c'est-à-dire que, jusque-là, il est comparable avec lui-même. Au-delà, il indique une température trop élevée, ce qui prouve qu'il faut moins de chaleur pour le faire monter de 1°, dans les hautes températures que dans les basses. Le thermomètre à mercure est donc préférable à ceux qui sont remplis avec d'autres liquides. Ce qui justifie encore cette préférence, c'est que les indications de ce thermomètre sont d'accord avec celles du thermomètre à air, comme nous le verrons en parlant de la dilatation des gaz, depuis — 36° jusqu'à 200°. A 300°, il y a une différence de 1° environ. Or, nous verrons qu'on a de bonnes raisons pour penser que l'air se dilate d'une manière plus régulière que les corps solides et liquides, et même de quantités sensiblement proportionnelles aux additions de chaleur qu'il reçoit.

Du thermomètre préférable pour les basses températures. — Le thermomètre à mercure ne pouvant être employé pour les températures inférieures à — 36°, on emploie dans ce cas le thermomètre à alcool; mais alors on n'a plus d'indications comparables, à cause de l'irrégularité de la dilatation de ce dernier liquide. Il y a plus, différents thermomètres à alcool ne sont pas même d'accord entre eux; ainsi, le capitaine Parry a vu quelquefois, à Port-Bowen, une différence de 10° entre plusieurs thermomètres à alcool construits par les meilleurs artistes. Le capitaine Franklin a trouvé une différence de 8°, par un froid de — 25° à — 30°. De plus, à ces basses températures, l'alcool absolu se sépare en partie de l'eau; le liquide n'est plus homogène, et il perd de sa fluidité. M. Muncke a alors proposé, vers 1836, de remplacer l'alcool par le sulfure de carbone, liquide qui ne se congèle pas par les plus grands froids, et qu'il est facile d'obtenir pur, tandis qu'il est presque impossible d'avoir de l'alcool bien identique et exactement au même degré de concentration.

M. I. Pierre, dans un grand travail sur la dilatation des liquides, dont nous parlerons plus loin, a comparé au thermomètre à mercure, des thermomètres gradués séparément, et faits avec douze liquides différents. Il a trouvé que le thermomètre à eau est le plus défectueux de tous; vers 53°, la différence

[1] Cela suppose qu'on néglige la chaleur que peut recevoir ou perdre le vase dans lequel on opère. Nous verrons plus tard qu'on peut se mettre à l'abri de cette cause d'erreur.

avec le thermomètre à mercure s'élève à plus de 22°. Les thermomètres à sulfure de carbone et à alcool viennent ensuite; le premier marque —28° quand le thermomètre à mercure marque —34°. Les thermomètres faits avec l'éther ordinaire, le chlorure d'éthyle et le bromure de méthyle, seraient les moins défectueux,

Comme c'est surtout pour les températures inférieures à 0° qu'il est important d'avoir des thermomètres comparables au thermomètre à mercure, on pourra les graduer en prenant pour point fixe, au lieu de 100°, une température inférieure donnée par comparaison avec le thermomètre à mercure; les différences seront alors moins prononcées pour les autres températures. Ainsi, en marquant directement, par comparaison, le point de 40° sur un thermomètre à sulfure de carbone, la différence avec le thermomètre à mercure n'est plus que de 1°,98, quand ce dernier marque —35°. Si donc on prenait, pour comparaison, le point —30°, par exemple, indépendamment du point de la glace fondante, pour déterminer la grandeur des degrés; en les portant au-dessous de —30°, on pourrait, pour les températures beaucoup plus basses, compter sur des indications comparables, à très peu de chose près, à celles qui sont données par les divisions comprises entre —30 et 0°. L'instrument ainsi gradué ne devra pas être employé pour les températures notablement supérieures à 0°.

706. De la sensibilité du thermomètre. — Il y a deux espèces de sensibilité, l'une relative à la petitesse des fractions de degré que peut indiquer l'instrument, l'autre à la rapidité avec laquelle il prend la température du milieu environnant pour en accuser les variations. Pour obtenir la première espèce de sensibilité, il faut employer de grands réservoirs, de manière que chaque degré occupe une grande longueur sur le tube. Pour l'autre, il est nécessaire que l'instrument ne contienne qu'une faible masse de mercure et présente une surface aussi grande que possible. Un réservoir cylindrique est, dans ce cas, préférable à un réservoir sphérique, et d'autant plus qu'il est plus long par rapport à son diamètre. Quand on le fait très long, on l'enroule en spirale pour qu'il occupe moins de place.

On peut, au reste, concilier les deux genres de sensibilité, en employant, avec un réservoir de petites dimensions, un tube très fin. Alors, pour que la colonne de mercure soit facile à distinguer, on donne à sa section intérieure la forme d'une ellipse très allongée, de manière que la colonne a la forme d'une lame, visible quand on la regarde par ses larges faces, et dont l'aire de la section est cependant très petite. On applique aussi sur le tube, en le fabricant, une bande en émail blanc, sur lequel la colonne de mercure se projette, ce qui permet de la distinguer plus facilement.

Thermomètres métastatiques. — M. Walferdin a imaginé des thermomètres qu'il nomme *métastatiques* et qui donnent les différences de températures en très petites fractions de degré, quoiqu'ils n'aient que de petites dimensions. Le thermomètre métastatique à mercure est formé d'un tube tellement capillaire

qu'il ne contient que quelques degrés *ab*, *bc*, *cd* (*fig.* 536) divisés en un très grand nombre de parties égales. A sa partie supérieure est un réservoir *o*, contenant un peu de mercure, et dans lequel le tube pénètre par une pointe effilée, de manière que la pointe plonge dans le mercure quand on renverse l'instrument. Pour se servir de ce thermomètre, il faut, chaque fois, en *régler la course*; pour cela on l'échauffe, de manière à faire sortir par la pointe autant de mercure qu'il est nécessaire pour que le niveau se trouve compris dans la colonne *ad* quand la température diffère peu de celle que l'on veut apprécier. Quand cette température est basse, on fait, au contraire, entrer du mercure par la pointe, en tenant l'instrument renversé pendant qu'il se refroidit, après avoir fait arriver le mercure jusqu'à la pointe par un échauffement convenable. Une fois la course réglée, on porte le thermomètre dans un bain dont la température connue diffère peu de celle que l'on veut évaluer; on prend note de la position du niveau du mercure, puis on porte l'instrument dans le milieu dont on veut connaître la température, et le nombre de divisions dont le niveau s'est déplacé indique la différence entre la température du bain et celle que l'on cherche. Par exemple, supposons que l'on veuille connaître les différences de températures de l'ébullition de l'eau, sous différentes pressions; on réglera la course de l'instrument de manière que le niveau soit entre *a* et *d* dans l'eau bouillante, on observera sa position, et en même temps on mesurera la pression atmosphérique P. Si la position du niveau dans le thermomètre est plus élevée de 15 divisions pour une autre pression P′, et s'il y a 1000 divisions par degré, on en conclura que la température de l'ébullition est plus élevée de $\frac{15}{1000}$ de degrés sous la pression P′ que sous la pression P. Quelquefois, au lieu d'une pointe effilée à l'extrémité du tube, on se contente d'y pratiquer un étranglement vers le point *d*, et quand le mercure est convenablement dilaté, on sépare la colonne en ce point par une petite secousse, et l'on observe les positions successives de l'interruption, quand elle descend au-dessous de l'étranglement.



Fig. 536.

Le thermomètre métastatique à alcool est fait comme celui qui contient du mercure, seulement il n'a pas de pointe effilée dans le réservoir supérieur, qui contient de l'alcool et une très petite goutte de mercure. Si l'on échauffe l'instrument et qu'on le laisse ensuite refroidir, la goutte de mercure s'engage dans le tube, et on en règle la position de manière que, pour les températures que l'on veut observer, elle se trouve à peu près au milieu de la tige, où elle sert d'index. On opère ensuite comme avec le thermomètre métastatique à mercure.

Il est à remarquer que la quantité de liquide qui forme le thermomètre est différente, d'après la manière dont on en a réglé la course; il faut donc, pour

chaque état de l'instrument, évaluer en degrés centigrades la valeur d'une de ses divisions. Un thermomètre métastatique à alcool ayant $0^m,15$ de longueur et un réservoir de 8^{mm} de longueur sur 4^{mm} de diamètre, indique les millièmes de degrés.

707. Thermomètres a air. — Quand on veut constater rapidement de faibles variations de température, on emploie des thermomètres à air. Le plus simple est représenté en A (*fig.* 537). Une goutte de liquide ou *index* sert à séparer le gaz intérieur, de l'air atmosphérique, et ses mouvements indiquent les variations de température. On voit en B une autre disposition : l'extrémité du tube plonge dans un vase ouvert contenant un liquide ; on fait sortir une partie de l'air en échauffant le réservoir, et le liquide monte dans le tube par le refroidissement. Les variations du niveau indiquent les changements de température. On gradue ces instruments, en marquant sur le tube deux températures t, t' données par un thermomètre à mercure, et l'on divise l'espace compris entre les points marqués, par $t'-t$. Les thermomètres à air ainsi construits sont évidemment influencés par les variations de la pression atmosphérique, mais ils sont commodes pour attester les changements rapides de température ; leur usage a été répandu surtout par Pictet.

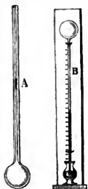


Fig. 537.



Fig. 538.

708. Thermomètres différentiels. — Leslie a imaginé un thermomètre à air sur lequel les pressions extérieures n'ont pas d'influence. Cet instrument consiste en un tube recourbé (*fig.* 538), dont les deux branches sont surmontées de deux boules égales. Le tube renferme une colonne *nan'* d'acide sulfurique concentré coloré avec du carmin, liquide qui ne donne pas de vapeurs sensibles à la température ordinaire. On introduit ce liquide, quand les deux branches sont séparées à l'un des angles, et on les réunit ensuite en les soudant à la lampe. En chauffant l'une des boules, l'air s'y dilate et pousse la colonne du côté opposé. On peut ainsi refouler tout le liquide dans une des boules, et faire ensuite passer de l'air dans cette boule à travers le liquide. En agissant ainsi, on peut, par tâtonnement, arriver à avoir la même masse d'air dans les deux boules, et alors les niveaux *n* et *n'* sont sur une même ligne horizontale quand les températures des deux boules sont les mêmes. On marque zéro à ce niveau commun ; on porte ensuite l'une des boules à une température supérieure à celle de l'autre, en l'enveloppant d'un vase que l'on remplit d'eau chaude

dont la température est donnée par un thermomètre à mercure. Le vase est fendu pour laisser passer le tube, et l'on ferme ensuite la fente avec du liége. Supposons que la température de l'eau dépasse de 10°, celle de l'air qui entoure l'autre boule, on marquera 10 au niveau du liquide dans les deux branches, et, partageant l'intervalle entre ce point et le point zéro, en 10 parties égales, on aura la grandeur des degrés, que l'on portera ensuite, sur chacune des branches, au-dessus et au-dessous du zéro. Tant que les niveaux ne quittent pas les parties verticales du tube, les indications sont d'accord avec celles du thermomètre à mercure; l'expérience le prouve, et cela résulte aussi, comme nous le verrons, des lois de la dilatation des gaz. On peut aussi, avec cet instrument, obtenir des températures absolues, et non de simples différences; il suffit pour cela de maintenir l'une des boules à 0°, en l'enveloppant de glace fondante.

Thermoscope de Rumfort. — Leslie a donné à son thermomètre différentiel une autre forme, imaginée en même temps par Rumfort, qui a donné à l'instrument le nom de *thermoscope*. Les deux boules (*fig.* 539) sont réunies par un long tube horizontal, dans lequel se trouve une goutte d'acide sulfurique concentré, *n*, qui sert d'index. Quand la température des deux boules est la même, l'index doit se trouver au milieu. Pour remplir cette condition, et régler l'instrument, on fait passer l'index dans un petit appendice *a*, après quoi on peut chasser de l'air d'une boule dans l'autre, en échauffant celle qui en contient trop. On fait ensuite rentrer l'index dans le tube horizontal, en l'inclinant convenablement, et l'on arrive par tâtonnement à avoir l'index au milieu quand les deux boules sont à la même température. On marque zéro aux deux extrémités de l'index, et l'on détermine un second point, pour avoir la grandeur des degrés, par le même moyen que pour le thermomètre différentiel. Tant que l'index du thermoscope reste dans le tube horizontal, ses indications sont comparables entre elles.

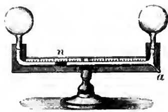


Fig. 539.



Fig. 540.

Une autre disposition due à Howard, et fréquemment employée, est celle que représente la *fig.* 540. Si l'on fait en sorte que les variations de volume de l'air contenu dans le réservoir *r* soient négligeables, les indications sont comparables entre elles. La disposition B (*fig.* 537) pourrait remplacer celle de la *fig.* 540, en fermant le vase inférieur, et n'y mettant que peu de liquide.

Le thermomètre à air est aussi employé pour évaluer les hautes températures; on lui donne alors le nom de *pyromètre à air*. Nous y reviendrons en étudiant les lois des dilatations des gaz.

709. De l'invention du thermomètre. — C'est sous la forme du thermomètre à air que cet instrument précieux a été inventé. Auparavant on n'avait que des idées vagues sur l'intensité du chaud et du froid. On ne sait pas au juste à qui l'on doit faire honneur de cette découverte. On l'attribue généralement à Cornélius Drebbel, fils d'un paysan de Nort-Hollande suivant les uns, né, suivant d'autres, à Alcmaer, d'une famille opulente. On en fait aussi hommage à Galilée, en 1597, à Bacou, Sanctorius, Fludd, Sarpi, Borelli. Il est probable que les esprits étant dirigés vers le même but scientifique, le thermomètre a pris naissance entre les mains de divers physiciens. Cependant, la question paraît devoir être décidée en faveur de Galilée, les dates que l'on donne pour l'époque de la découverte des autres prétendants, étant postérieures à l'année 1597. Le thermomètre de Galilée avait la forme que l'on voit en A (*fig.* 537), et celui de Drebbel celle que l'on voit en B. C'est sous cette dernière forme que le thermomètre se répandit en Flandre et en Angleterre, ce qui explique pourquoi Drebbel passe généralement pour en être l'inventeur.

Les académiciens de Florence construisirent le premier thermomètre à liquide; ils employèrent l'alcool. Halley, Roemer, Fahrenheit, employèrent le mercure, vers 1680, et Newton employa l'huile de lin. D'abord, l'échelle étant arbitraire, les différents thermomètres n'étaient pas comparables entre eux [1]. Le premier qui paraît avoir tenté d'établir une échelle fixe est Renaldini, vers 1694; il plongeait l'instrument dans la glace fondante, puis dans des mélanges d'eau froide et d'eau bouillante en proportions déterminées. Newton marquait 0° à la glace fondante et prenait pour second point fixe la température du sang de l'homme, à laquelle il marquait 12°. Fahrenheit fit aussi des thermomètres comparables ; on ne sait pas au juste par quel moyen. Vers le même temps, Réaumur graduait des thermomètres de grandes dimensions, en y mettant d'abord de l'eau, dans laquelle il versait des mesures égales de mercure correspondant à la centième partie du volume du réservoir, et il marquait l'élévation de niveau produite par chaque addition de mercure ; puis il remplaçait l'eau par de l'alcool. Il graduait ensuite, par comparaison, des thermomètres de moindres dimensions. C'est par reconnaissance pour ces travaux que les physiciens ont donné le nom d'échelle de Réaumur à la division en 80 parties. Celsius, à Upsal, vers 1741, adopta le point de la fusion de la glace et celui de l'eau bouillante, et la division en 100 parties ; ce que l'on attribue quelquefois à Newton. C'est à partir de cette époque que le thermomètre est devenu un instrument exact ; depuis, il a reçu de nombreux perfectionnements, et a été

[1] Cependant les académiciens de Florence construisaient des thermomètres divisés en 50 parties, qui marchaient à peu près d'accord entre eux, parce qu'ils s'appliquaient à leur donner exactement les mêmes dimensions. On a retrouvé quelques-uns de ces instruments, et M. Libri a reconnu qu'ils marquent 13°,5, pour la température de la glace fondante. Leur zéro correspondait à la température des caves à Florence (*Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. XLV).

l'objet des travaux d'un grand nombre de physiciens, parmi lesquels il faut citer en première ligne Dulong et Petit.

710. THERMO-MULTIPLICATEUR. — Les thermomètres dont nous avons parlé jusqu'à présent sont tous fondés sur la dilatation des corps; nous allons décrire un appareil thermométrique extrêmement sensible, dans lequel on observe des effets de la chaleur tout différents, effets que nous aurons à décrire plus tard avec détail. Pour le moment nous nous bornerons à poser deux principes qu'il est nécessaire de connaître pour comprendre cet appareil et la manière d'en faire usage.

1° Une aiguille aimantée suspendue horizontalement sur une pointe, s'arrête dans une position déterminée, de manière que son axe reste dirigé à peu près du *nord* au *sud*. Quand on la dérange de cette position, elle y revient après

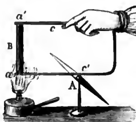


Fig. 541.

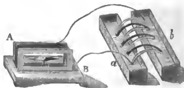


Fig. 542.

avoir accompli un certain nombre d'oscillations d'amplitude décroissante. Cette propriété est utilisée dans la boussole des marins.

2° Si l'on forme une courbe fermée, avec deux métaux différents B, *cc'* (*fig.* 541), soudés l'un à l'autre en *a* et *a'*, et si on la place très près de l'aiguille aimantée A, de manière qu'une partie de la courbe lui soit parallèle, il n'y aura aucun changement dans la position de l'aiguille, tant que les deux soudures *a* et *a'* seront à la même température; mais si l'une des soudures est plus chaude que l'autre, l'aiguille sera déviée et s'approchera d'autant plus de la position perpendiculaire au côté *c'*, que la différence de température des soudures sera plus grande. Cet effet est dû à du *fluide électrique* développé par la chaleur, et qui circule dans l'arc métallique, en formant ce que l'on nomme un *courant électrique*. Nobili et Melloni ont tiré parti de ces phénomènes pour comparer les effets calorifiques, par les quantités dont est déviée l'aiguille aimantée.

Au lieu de former un circuit au moyen de deux arcs métalliques soudés l'un à l'autre, si on le forme au moyen de plusieurs fragments de deux métaux soudés, en *alternant*, les uns aux autres, et si l'on élève la température des soudures *paires* seulement, par exemple en les plongeant dans de l'eau chaude *b* (*fig.* 542), tandis que les soudures *impaires* sont plongées dans l'eau froide *a*, ou réciproquement, l'effet sur l'aiguille aimantée, pour une même différence de

température, sera beaucoup plus prononcé que lorsqu'il n'y a que deux soudures. Ce système de métaux soudés se nomme une *pile thermo-électrique*.

On peut aussi rendre l'action du courant électrique beaucoup plus intense sur l'aiguille aimantée, en faisant passer une partie du circuit plusieurs fois autour de l'aiguille, avec la précaution de séparer les différents tours les uns des autres avec de la soie qui empêche le fluide électrique de s'élancer d'un tour à l'autre, de sorte qu'il est forcé de parcourir tout le circuit. On a alors ce qu'on appelle un *galvanomètre*, ou *réomètre multiplicateur* AB (*fig.* 542).

744. Description de l'appareil. — Ces principes une fois posés, voici en quoi consiste l'appareil de Nobili et Melloni : il se compose essentiellement de deux parties : 1° une *pile thermo-électrique* ; 2° un *réomètre-multiplicateur* destiné à faire connaître, par la déviation de l'aiguille aimantée, l'intensité du courant électrique, et par suite à accuser la différence de température entre les deux ordres de soudure de la pile thermo-électrique.

Pile thermo-électrique. — La pile est composée de petits barreaux en bismuth et en antimoine, de 2 ou 3 centimètres de longueur, soudés alternativement les uns aux autres, et repliés, comme on le voit en *ab* (*fig.* 543), de manière à former un parallélipipède rectangle *cd*, dont une des bases contient toutes les soudures paires, tandis que l'autre contient toutes les soudures impaires. En *cd*, est représenté l'ensemble de la pile ; elle est enveloppée d'une lame mince de laiton, qui en est séparée par une bande de papier. On aperçoit en *c* et *d*, les soudures des barreaux, formant les deux *faces* de la pile. Les deux extrémités de la chaîne métallique viennent aboutir aux chevilles en laiton *oo'*, auxquelles sont adaptés des fils de cuivre que l'on met en communication avec le fil qui forme le réomètre multiplicateur. Enfin, les deux faces de la pile sont recouvertes d'une légère couche de noir de fumée, qui a la propriété d'absorber la chaleur plus complètement que tout autre substance, comme nous l'établirons plus loin. Un tube *t*, noirci en dedans et muni d'un écran mobile *e*, peut s'adapter à chaque extrémité, pour abriter les faces de la pile, de la chaleur qui pourrait venir latéralement.

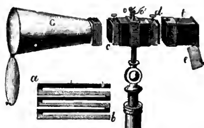


Fig. 543.

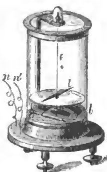


Fig. 544.

Réomètre multiplicateur. — Cette seconde partie de l'appareil (*fig.* 544) est formée d'un fil de cuivre enveloppé de soie, qui fait plusieurs tours sur un

cadre *ab*; une aiguille aimantée est suspendue dans l'intérieur du cadre : pour qu'elle soit très mobile, elle est soutenue par un fil de soie sans torsion *f*; une seconde aiguille *l*, fixée parallèlement à la première par l'intermédiaire d'une petite tige verticale qui traverse le haut du cadre *ab*, sert à marquer les déviations sur un limbe horizontal. On commence par orienter le réomètre de manière que les aiguilles aimantées se trouvent dans le plan du cadre; alors l'aiguille *l* correspond au zéro du limbe. Si, alors, après avoir fait communiquer par des fils métalliques, les chevilles *o*, *o'* (*fig.* 543), avec les extrémités *n*, *n'* (*fig.* 544) du fil du réomètre, on vient à échauffer l'une des faces de la pile *cd* (*fig.* 543), cette élévation de température déterminera une déviation dans les aiguilles. Si, au contraire, on refroidit cette base, ou, ce qui revient au même, si l'on échauffe l'autre, l'aiguille sera encore déviée, mais en sens contraire.

L'appareil que nous venons de décrire est précieux surtout pour constater les effets de la chaleur rayonnante; il est tellement sensible qu'il est affecté par la chaleur naturelle d'une personne placée à une distance de 8 à 10^{m}, surtout quand on garnit la face qui reçoit la chaleur d'un cône poli en dedans C (*fig.* 543), destiné à recevoir une plus grande quantité de chaleur. Au moyen de cet appareil, Nobili et Melloni ont constaté que les insectes dégagent de la chaleur, en les renfermant dans le tube *t* (*fig.* 543) garni d'une toile métallique du côté de la pile et fermé du côté extérieur. Ils ont reconnu que la faible lueur du phosphore est accompagnée de chaleur. Enfin, Melloni, en concentrant les rayons de la lune, sur une des faces de la pile, au moyen d'une lentille de 1 mètre de diamètre, a vu l'aiguille du réomètre se dévier de 3° environ; ce qui prouve que ces rayons possèdent une chaleur sensible, ce dont on avait douté jusqu'alors. Du reste, la faible intensité de cette chaleur est en rapport avec celle de la lumière de la lune, qui n'est que 3 à 4 cent millièmes de celle que le soleil nous envoie.

712. Tables de graduation. — Les déviations de l'aiguille du réomètre, ne sont pas, en général, proportionnelles aux effets calorifiques produits par la chaleur rayonnante qui frappe la base de la pile. C'est pourquoi, lorsqu'on veut évaluer l'intensité de cette chaleur, on construit pour chaque appareil, une table donnant cette intensité pour chaque déviation. Melloni a employé pour cela deux méthodes principales [1], fondées l'une et l'autre sur la proportionnalité entre les effets calorifiques et les déviations, quand ces dernières ne sont que d'un petit nombre de degrés, de 20° au plus [2].

La première méthode consiste à faire agir de chaque côté de la pile deux sources constantes, que l'on place d'abord à des distances telles que l'aiguille

[1] *Mémoires de l'Académie des sciences de Paris*, p. 443 (1834); et *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. LIII, p. 5.

[2] Cette limite dépend de la manière dont le fil métallique du réomètre est enroulé sur le cadre de l'appareil. Elle varie donc d'un instrument à un autre.

du réomètre reste au zéro. On éloigne ensuite un peu l'une des sources, de manière à obtenir un écart de 5 ou 6 degrés, pour lequel la déviation est proportionnelle à la différence des effets calorifiques sur les deux faces. On intercepte alors, avec un écran, les rayons venant d'une des sources, et l'on observe la déviation produite par l'autre agissant seule ; on cherche de même la déviation en sens opposé produite par celle-ci quand l'autre est cachée : et l'on trouve que si la déviation la plus grande ne dépasse pas 20°, la différence de ces deux déviations est égale à la déviation observée sous l'influence des deux sources agissant simultanément. Par exemple, si l'une des sources produit seule une déviation de 15°, l'autre une déviation en sens contraire de 5°, la différence sera de 10°, et les deux sources agissant simultanément donneront une déviation égale à cette différence. Mais si l'une des déviations est plus grande que 20°, il n'en sera plus ainsi. Par exemple, dans une des expériences de Melloni, les déviations étant de 42° et 44°, dont la différence est 2°, la déviation a été de 8° quand les deux sources agissaient ensemble. La différence calorifique nécessaire pour faire parcourir 2° dans le voisinage du 42e degré est donc 4 fois plus grande que celle qui les ferait parcourir dans le voisinage du zéro. Il faut donc, vers le 42e degré, quadrupler le nombre de degrés observé pour que les indications soient comparables à celles qui sont fournies par les faibles déviations. Melloni a ainsi étudié la marche de l'aiguille, de 4° en 4° à partir du 2e degré, et en poussant les observations jusqu'à 44°. Il a trouvé, par ce moyen, que les arcs compris entre 20° et 24°, 24° et 28°..., équivalent à 5°,12 ; 6°,44... pris à partir du zéro. Les valeurs intermédiaires, de 20° à 21, de 21 à 22, etc., ont été fournies par une construction graphique ou par interpolation. Avec ces résultats, il est facile de construire une table allant de degré en degré, indiquant, par exemple, que la déviation de 28° équivaut à 31°,6 ; celle de 36°, à 49°,5 ; etc., des degrés pris dans le voisinage du zéro. Les tables ne vont que de degré en degré ; pour les fractions de degré, on emploie une simple proportion, ce qui revient à admettre que la courbe se confond avec sa tangente dans l'intervalle de deux ordonnées correspondantes à deux degrés voisins.

Une autre méthode consiste à faire d'abord agir sur la pile une source qui produise une petite déviation, de 10° par exemple. On interpose ensuite une lame de verre, qui intercepte une partie de la chaleur, et la déviation est moindre, par exemple, de 5° ; d'où l'on conclura que la lame de verre intercepte la moitié des rayons. On approche alors la source, de manière à obtenir une grande déviation, par exemple, de 30° ; on interpose la lame, et la déviation, au lieu d'être de 15°, sera, par exemple, de 17°,6, nombre au-dessous de la limite de 20°. On en conclura que les 30° équivalent à $2 \times 17,6 = 35°,2$. Les résultats obtenus par ce moyen ont toujours été d'accord avec ceux que fournit l'autre méthode.

Pour établir ainsi des tables de graduation expérimentalement, il faut employer les soins les plus minutieux. Ces tables ne conviennent qu'à l'appareil avec lequel on les a construites. L'expérience a prouvé que les résultats qui y sont consignés restent les mêmes, quelle que soit la source calorifique ; et l'on peut s'assurer que les déviations données par les tables sont proportionnelles aux quantités de chaleur reçues, en faisant agir une même source, à différentes distances. On trouve que les déviations corrigées d'après les tables sont en raison inverse des carrés des distances ; or, nous verrons que c'est précisément suivant cette loi que varie l'intensité des rayons envoyés par une même source à différentes distances.

Tables d'impulsion. — Dés que la chaleur frappe la base de la pile, l'aiguille du réomètre se met en mouvement, et elle ne s'arrête à une position d'équilibre qu'aprés avoir oscillé pendant un temps assez long. Melloni abrège ce temps en plaçant au-dessous de l'aiguille aimantée un disque de cuivre, dont la présence a pour effet d'amortir les oscillations ; effet que nous expliquerons en traitant de *l'électro-magnétisme* (tome III).

Malgré cette précaution, les oscillations se succèdent encore pendant un temps assez long pour que la base de la pile s'échauffe à une certaine profondeur. Il faut donc, avant de continuer les expériences, attendre qu'elle se soit refroidie, ce qui a lieu quand l'aiguille est revenue à sa position première. Melloni évite cette perte de temps, de la manière suivante. Dés que la chaleur frappe la pile, l'aiguille part, son extrémité décrit un arc maximum, nommé *arc d'impulsion*, puis revient sur ses pas et fait des oscillations d'amplitude décroissante. Or, Melloni a reconnu par l'expérience que l'arc d'impulsion est toujours le même pour une déviation définitive donnée ; mais qu'il change, d'une déviation à une autre. On forme alors une table, dans laquelle, à côté de chaque déviation, se trouve l'arc d'impulsion correspondant. On n'a donc plus qu'à observer ce dernier arc, et la table fait connaître la déviation qu'eût donnée l'aiguille, si on lui eût laissé le temps de prendre sa position d'équilibre.

Nous reviendrons plus en détail sur la théorie du *thermo-multiplicateur*, quand nous étudierons les phénomènes thermo-électriques sur lesquels s'appuie cette théorie (tome III).

Nous aurons aussi occasion de faire connaître, par la suite, d'autres instruments thermométriques destinés à des usages spéciaux. Ceux que nous venons de décrire suffisent pour l'étude des lois de la chaleur.

CHAPITRE II.

DE LA CHALEUR RAYONNANTE.

.....Car la lumière n'est que de la chaleur rayonnante devenue capable de traverser les humeurs de l'œil.....

(AMPÈRE, *Ann. de ch. et de ph.*, 2e série, t. 58).

§ 1. — MARCHE DES RAYONS DE CHALEUR DANS UN MÊME MILIEU.

I. Lois de la transmission de la chaleur à distance.

713. La chaleur se propage à distance. — La chaleur peut se propager de deux manières : dans la substance même des corps, de molécule à molécule, ou bien à travers l'espace, et à de grandes distances de la source dont elle émane. Cette chaleur en mouvement hors des corps se nomme *chaleur rayonnante*; son existence est évidente quand il s'agit de la chaleur du soleil, qui nous arrive de 35 millions de lieues à travers l'espace. Mais cette chaleur est accompagnée de lumière; elle constitue ce qu'on appelait autrefois la *chaleur lumineuse*, et on a longtemps douté que la *chaleur obscure* possédât les mêmes propriétés.

Leslie pensait que la transmission de la chaleur à distance était due à un mouvement vibratoire causé dans l'air par le contact du corps chaud, et transmettant la chaleur de couche en couche; il croyait même que les rayons du soleil n'avaient de chaleur qu'après avoir rencontré l'atmosphère, et il expliquait le froid qui règne sur les hautes montagnes par la rareté de l'air qu'on y rencontre. Mais Scheele a démontré que l'air ne joue aucun rôle dans la transmission à distance, en faisant voir que le renouvellement rapide de l'air, dans l'espace qui sépare le corps d'où émane la chaleur, de celui qui la reçoit, ne change rien aux effets produits. C'est à Scheele que sont dues les premières recherches sur la propagation à distance; il opérait avec la chaleur sortant par la porte d'un poêle. Mariotte paraît avoir montré le premier que la chaleur obscure se propage par rayonnement comme la lumière, et Lambert a ensuite fait une étude particulière de ces phénomènes. Pour lever tous les doutes,

il était nécessaire d'opérer dans le vide. C'est ce qu'on ne manqua pas de faire. L'expérience la plus complète est celle qui suit, due à Rumfort.



Fig. 545.

Rayonnement dans le vide. — Un ballon contenant un thermomètre, *a* (*fig.* 545), est soudé à un tube de plus de 1 mètre de longueur, ouvert à son extrémité. On remplit le ballon et le tube de mercure sec et purgé d'air, on ferme l'ouverture avec le doigt, et l'on renverse l'appareil dans une cuvette pleine de mercure, comme pour faire un baromètre. Le mercure quitte le ballon et se soutient dans le tube à une hauteur de $0^m,76$ environ. Le ballon est alors aussi exactement vide que possible. Ensuite, faisant tourner le tube sur lui-même, on pousse la flamme d'une lampe en *e*, au moyen du chalumeau. Le verre se ramollit, la pression atmosphérique le déprime, il se forme un étranglement, *e*, et le tube est bientôt obstrué. En soulevant alors le ballon, on le sépare, hermétiquement fermé et parfaitement vide.

Pour prouver le rayonnement de la chaleur obscure à travers le vide, on plonge ce ballon dans l'eau chaude, et l'on voit aussitôt le thermomètre monter par l'effet de la chaleur qu'il reçoit des parois. On peut objecter que la chaleur est arrivée jusqu'au liquide que contient le thermomètre, par l'intermédiaire de sa tige soudée en *a* au ballon ; mais, si l'on plonge dans l'eau chaude l'extrémité *a* seulement, le thermomètre ne monte plus, ou du moins ne monte que d'une quantité beaucoup plus petite.

Corps diathermanes. — La chaleur se propage donc dans le vide ; elle peut aussi traverser directement certaines substances, sans être absorbée pour les échauffer. Il est évident que l'air est une de ces substances ; le verre est dans le même cas, et en général les corps transparents pour la lumière. Mais comme les substances qui se laissent traverser par la chaleur n'ont pas toutes la propriété de laisser passer la lumière, et *vice versâ*, Melloni a désigné sous le nom de *diathermanes* celles qui sont dans le premier cas. Ce mot correspond pour la chaleur, au mot *transparent* relativement à la lumière. Nous nous occuperons en particulier des modifications qu'éprouvent les rayons de chaleur en traversant les substances diathermanes (733).

714. Rayonnement apparent du froid. — On peut faire avec le ballon de Rumfort, une expérience qui prouve que *le froid* n'est pas un agent particulier, mais simplement l'effet d'une perte de chaleur. Si l'on plonge le ballon dans un liquide très froid, le thermomètre baisse, ce que l'on pourrait être tenté d'attribuer à un rayonnement du froid ; mais si, après avoir tenu le ballon pendant quelque temps dans un liquide plus froid encore, on vient à le reporter dans le premier, le thermomètre remonte. Il reçoit donc alors de la chaleur de ce liquide, qui d'abord semblait lancer du froid. Ainsi, les corps les plus froids

envoient de la chaleur, et si le thermomètre baisse, dans la première expérience, c'est que lui aussi rayonne de la chaleur et en perd, quand il est dans une enceinte plus froide que lui. L'impression de froid que l'on ressent en approchant sa main d'un bloc de glace provient de même de ce que la main rayonne beaucoup de chaleur vers la glace, et non du froid que lance celle-ci; car si l'on place le bloc près d'un thermomètre indiquant une température inférieure à la sienne, on verra aussitôt ce thermomètre monter.

Nous devons conclure de là qu'il n'y a pas de *rayons frigorifiques* comme on l'a admis longtemps; le froid n'est que le résultat d'une perte de chaleur qui n'est pas compensée, d'où résulte une impression particulière, ou, dans le cas des corps bruts, une diminution de volume. Nous ajouterons aussi qu'il n'y a pas lieu de distinguer la chaleur, quant aux lois du rayonnement, en chaleur lumineuse et chaleur obscure; ces lois étant exactement les mêmes dans les deux cas.

715. Lois de la propagation de la chaleur rayonnante. — La chaleur se propage en ligne droite. Pour le prouver, il suffit de placer entre un foyer de chaleur et l'une des boules d'un thermoscope, ou la base de la pile du thermo-multiplicateur, une suite d'écrans percés d'une petite ouverture. Ce n'est que lorsque toutes ces ouvertures sont sur une même ligne droite passant par la source de chaleur, que l'on voit l'appareil thermoscopique indiquer une élévation de température. Si l'on fait passer la chaleur par un tube, il faudra qu'il ait une position et une forme telles qu'une ligne droite allant d'un point de la source de chaleur au thermomètre, ne touche pas la surface intérieure de ce tube; sans cela il n'y a pas d'effet calorifique indiqué.

Rayon de chaleur. — On nomme rayon de chaleur, toute direction prise à partir d'une surface qui émet de la chaleur, et suivant laquelle cette chaleur se propage. De là le nom de *chaleur rayonnante* donné par Scheele à la chaleur en mouvement hors des corps. Un faisceau de chaleur n'est autre chose qu'un espace conique ou prismatique, dans tous les points duquel passent des rayons de chaleur qui partent du sommet du cône ou de la base du prisme.

Un corps homogène, dont tous les points sont à la même température, rayonne également dans tous les sens. Cependant, si l'on dispose autour d'un boulet rouge plusieurs thermomètres égaux, on remarque que ceux qui sont en haut montent plus vite que les autres. Ce résultat est dû à l'air dilaté par le boulet, qui, en s'élevant, à cause de sa diminution de densité, rencontre le thermomètre supérieur et lui communique, par contact, la chaleur qu'il a empruntée au boulet. Les académiciens de Florence, ayant placé deux thermomètres dans la chambre d'un baromètre, l'un en haut et l'autre en bas, ont reconnu qu'un corps chaud placé à côté du tube et à égale distance des deux thermomètres les échauffait autant l'un que l'autre.

Quand plusieurs faisceaux de chaleur venant de différentes sources, passent en même temps par une même ouverture, ils ne se gênent pas et ne se modifient pas mutuellement; car un thermomètre *t* (*fig.* 546) placé sur le trajet

d'un de ces faisceaux, ne varie pas quand on intercepte les autres au moyen d'écrans, *e*, *e'*, ou quand on enlève ces écrans. Ce résultat s'explique, dans le système des ondulations, par le principe de la coexistence des petites oscillations (I, 500).

716. De la vitesse de la chaleur. — On n'a pas pu évaluer jusqu'à présent la vitesse avec laquelle la chaleur se transmet. Toutes les fois qu'on lève un écran interposé entre une source de chaleur et un thermoscope très sensible, on voit ce dernier indiquer immédiatement l'arrivée de la chaleur, quelque éloignée que soit la source d'où elle émane. Pictet a opéré sur une distance de 69 pieds, au moyen des miroirs conjugués, appareil que nous décrirons plus loin (720). La chaleur semble donc se transmettre instantanément ; mais comme les lois de la chaleur rayonnante et celles de la propagation de la lumière sont exactement les mêmes, on doit penser que les vitesses de transmission de ces deux agents sont, sinon identiques, du moins du même ordre de grandeur. Or, la vitesse de la lumière est de 70 à 80 mille lieues par seconde ; la chaleur possède donc aussi une vitesse extrêmement grande, et telle que, pour les distances que l'on considère à la surface de la terre, on peut la regarder comme se transmettant instantanément.

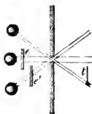


Fig. 546.

II. Réflexion de la chaleur.

717. Définitions. — Lorsque des rayons de chaleur rencontrent la surface de séparation de deux milieux différents, l'expérience montre qu'ils se divisent en deux parties ; l'une qui passe au-delà de la surface de séparation et pénètre dans l'intérieur du second milieu, l'autre qui revient dans le premier milieu. Ce retour des rayons, du même côté de la surface de séparation, constitue le phénomène de la *réflexion* de la chaleur. Les expériences que l'on fait, pour établir les lois de la réflexion, prouvent en même temps l'existence du phénomène.

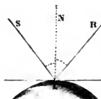


Fig. 547.

On nomme *rayon incident* le rayon calorifique SI (*fig.* 547) avant sa rencontre avec la surface ; et *rayon réfléchi*, le rayon, IR, après sa rencontre. Le point I se nomme *point d'incidence*. L'angle SIN, que fait le rayon incident avec la normale IN à la surface de séparation des deux milieux, se nomme l'*angle d'incidence*, et l'angle RIN que fait le rayon réfléchi avec la même normale, *angle de réflexion*.

718. Lois de la réflexion. — 1° *Le rayon incident, le rayon réfléchi et la normale au point d'incidence sont dans un même plan.*

2° *L'angle d'incidence est égal à l'angle de réflexion.*

Pour démontrer ces lois directement, on fait tomber un faisceau de rayons calorifiques, limité par son passage à travers des ouvertures pratiquées dans des écrans, sur une surface plane et polie qui les réfléchit, et l'on place la pile du thermo-multiplicateur (711) de manière que le prolongement de son axe passe par le point d'incidence, et qu'elle reçoive le faisceau réfléchi. On trouve alors que la surface réfléchissante fait des angles égaux avec cet axe et avec la direction des ouvertures des écrans, et qu'elle est perpendiculaire au plan de ces deux directions; ce qui prouve les deux lois énoncées. Mais ce moyen ne donne qu'une grossière approximation, à cause de la nécessité d'employer un faisceau calorifique d'une section assez grande pour qu'il puisse agir sur l'appareil thermométrique, et alors il n'y a rien de précis dans la détermination des directions des faisceaux incident et réfléchi. Cet inconvénient n'existe pas pour la lumière, notre œil pouvant être impressionné par un faisceau lumineux d'une finesse excessive; aussi les lois de la réflexion de la lumière, qui sont les mêmes que celles de la réflexion de la chaleur, peuvent-elles se démontrer directement par l'expérience avec une précision extrême, comme nous le verrons dans l'optique. Cette circonstance nous offre un moyen de prouver les mêmes lois pour la chaleur, en constatant que la marche de ces rayons, après la réflexion, est la même que celle des rayons lumineux réfléchis sur le même miroir, après l'avoir rencontré sous les mêmes incidences.

719. Miroirs paraboliques. — Nous pouvons prouver les lois de la réflexion de la chaleur, sans invoquer les propriétés de la lumière, au moyen des miroirs concaves paraboliques, c'est-à-dire au moyen de surfaces polies ayant la forme d'un paraboloïde de révolution. Or, d'après les propriétés de la parabole, si l'on mène par un point m de la courbe (*fig.* 548), une droite mS, parallèle à l'axe, et une autre mf passant par le *foyer* de la courbe, l'angle de ces deux droites sera partagé en deux parties égales par la normale mn. Réciproquement, si, ayant mené une droite fm, du foyer à un point m de la courbe, on mène par ce point une parallèle mS à l'axe du paraboloïde, l'angle Smn sera égal à l'angle fmn, et sera dans le même plan. Si donc nous plaçons un point rayonnant, au *foyer* d'un miroir parabolique, et si les rayons, après s'être réfléchis sur ce miroir, forment un faisceau parallèle à son axe, nous devrons en conclure que la réflexion s'est faite suivant les lois énoncées. Si, d'un autre côté, on reçoit sur le miroir un faisceau de rayons parallèles à son axe, ces rayons, après la réflexion, devront se croiser au foyer. Tous ces résultats sont d'accord avec

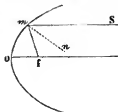


Fig. 548.

l'expérience. On opère de la manière suivante : on place en face l'un de l'autre, à une distance de 10 à 15 mètres, deux miroirs paraboliques *m* et *n* (*fig.* 549), ordinairement en laiton, de manière que leurs axes coïncident. Au foyer F de l'un d'eux, on dispose des charbons ardents contenus dans une corbeille en fils

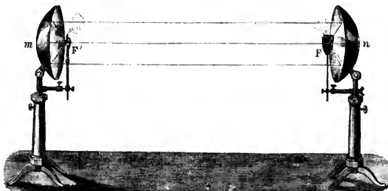


Fig. 549.

de fer, et au foyer de l'autre, F', on place un corps facile à enflammer ; comme de l'amadou ou du fulmi-coton. Au bout de quelques instants l'inflammation se produit. L'expérience ne réussirait pas si le corps inflammable était hors du foyer du miroir. Si l'on met en F une très petite boule incandescente, en plaçant en F' le réservoir d'un très petit thermomètre, on trouve qu'il ne monte que lorsqu'on le place exactement au foyer. Enfin, on remarque qu'en plaçant une bougie en F, le point où se rassemblent les rayons lumineux coïncide avec le point F'.

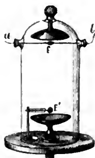


Fig. 550.

Réflexion dans le vide. — Les lois de la réflexion sont indépendantes de la présence de l'air, car l'expérience qui précède réussit tout aussi bien dans le vide, comme l'a montré H. Davy. Les deux miroirs paraboliques (*fig.* 550) sont placés l'un au-dessus de l'autre, dans un même récipient dont on extrait l'air. Au foyer *f'* du miroir supérieur, se trouve un fil très fin en platine, replié plusieurs fois sur lui-même, et soudé à deux fils de cuivre plus gros *a* et *b*, qui sortent du récipient par deux tubulures. Si l'on fait passer un *courant électrique* à travers le fil *ab*, la portion *f* devient incandescente, et l'on voit un thermomètre placé au foyer *f'* monter aussitôt.

720. Propriétés des miroirs sphériques. — Les miroirs sphériques concaves peuvent aussi servir à mettre en évidence des conséquences des lois de la réflexion, de manière que, en les vérifiant par l'expérience, on ait une preuve nouvelle de l'exactitude de ces lois. Soit S (*fig.* 551) un centre de rayonnement calorifique. En joignant le point S au centre de courbure *o* du miroir, on a ce que l'on appelle l'*axe* du miroir par rapport au point S. Menons un rayon incident S*m* qui rencontre au point *m* la surface polie du miroir sphérique *mm'* ; ce rayon se réfléchira suivant *mf*, en faisant l'angle *omf* égal à S*mo*, et viendra couper l'axe S*o* en un point *f*. Nous allons faire voir que ce point de rencontre est le même pour tous les rayons

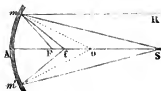


Fig. 551.

réfléchis émanant du point S, en supposant que l'arc *mm'* soit infiniment petit par rapport au rayon de courbure A*o* ; il suffira de le démontrer pour les rayons qui tombent sur un même méridien *mm'*. Pour cela calculons la distance *f*A. L'angle au sommet du triangle S*mf* étant divisé en deux parties égales par la normale *mo*, on aura $mf : m\text{S} = of : o\text{S}$. Représentons par *p* la distance SA, que nous regardons comme égale à S*m* parce que l'arc A*m* est infiniment petit ; par *p'* la distance *f*A, égale à *fm* par la même raison ; et enfin par *r* le rayon de courbure A*o*, la proportion devient

$$p' : p = r - p' : p - r, \qquad \text{d'où} \qquad \frac{1}{p'} + \frac{1}{p} = \frac{2}{r}, \qquad [1]$$

en faisant le produit des extrêmes égal à celui des moyens, et divisant tous les termes par $pp'r$. L'expression [1] se nomme la *formule des miroirs sphériques*. De cette relation, on tire la valeur de *p'* ou de la distance *f*A, et l'on voit que cette distance ne dépend pas de la position particulière du point *m*, par conséquent qu'elle serait la même pour tout autre rayon incident que le rayon S*m* Si le centre calorifique était au point *f*, il est évident, d'après les lois de la réflexion, que les rayons réfléchis iraient former leur foyer au point S. A cause de cette réciprocité, les points S et *f* se nomment *foyers conjugués*.

Dans la pratique, l'arc *mm'* ne peut pas être infiniment petit ; mais s'il est très petit par rapport au rayon *o*A, c'est-à-dire s'il ne comprend qu'un petit nombre de degrés, les propriétés que nous venons de démontrer se vérifient encore approximativement, et l'espace où se croisent les rayons réfléchis est resserré dans une étendue d'autant plus petite que l'arc *mm'* comprend un plus petit nombre de degrés.

L'expérience vérifie tous ces résultats. Quand la source de chaleur placée en avant du miroir occupe un espace assez grand, chacun de ses points possède un axe particulier et forme sur cet axe un foyer conjugué qui lui correspond.

L'espace dans lequel on peut placer le thermomètre a donc lui-même une étendue en rapport avec celle du corps chaud.

Foyer principal. — Dans le cas particulier des rayons parallèles, c'est-à-dire quand on a $p = \infty$, l'axe n'est autre chose que le rayon qui passe par le centre *o*. La formule donne alors $p' = \frac{1}{2} r$; c'est-à-dire que le foyer est au milieu du rayon de courbure. Ce résultat peut se prouver directement : soit R*m* (*fig.* 551) un rayon parallèle à l'axe *o*A, et *m*F le rayon réfléchi qui lui correspond. Le triangle *om*F est isocèle ; car l'angle *mo*F est égal à R*mo*, parce qu'ils sont alterne-interne, et l'angle *om*F est égal aussi à R*mo*, d'après les lois de la réflexion. Le côté *o*F est donc égal à *m*F ; et comme *m*F = AF, l'arc *Am* étant infiniment petit, le point F est le milieu de A*o*. Le foyer F formé par les rayons parallèles se nomme *foyer principal* du miroir sphérique.

Réciproquement, si le point rayonnant est placé au foyer principal, les rayons réfléchis forment un faisceau parallèle à l'axe F*o*. Il résulte de là que l'expérience des deux miroirs (*fig.* 549) peut se faire avec des miroirs sphériques. Cette expérience, fort ancienne, est attribuée par Nollet aux jésuites de Prague, et connue sous le nom d'expérience des *miroirs conjugués*. Pictet, le premier, l'a faite avec de la chaleur obscure ; il plaçait à l'un des foyers un vase rempli d'eau bouillante, et à l'autre un thermomètre.

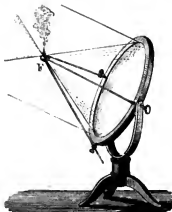


Fig. 552.

721. Miroirs ardents. — Si l'on fait tomber les rayons du soleil sur un miroir sphérique concave, ils se réunissent, après la réflexion, au foyer principal, parce que les rayons du soleil sont très sensiblement parallèles, à cause de la grande distance de cet astre. Si l'on met en ce point des matières inflammables, on les voit brûler promptement, pour peu que le miroir ait 20 ou 30 centimètres d'ouverture. Les miroirs en glace étamée produisent des effets bien plus énergiques que les miroirs métalliques

Quand le miroir a une grande ouverture, et en même temps un grand rayon de courbure, pour qu'il ne comprenne qu'un petit nombre de degrés, il peut fondre les métaux, les matières terreuses, etc. La *fig.* 552 représente un miroir ardent destiné à ces sortes d'expériences. En F est un support qui sert à soutenir les substances que l'on veut exposer à l'action des rayons solaires concentrés au foyer.

Parmi les miroirs ardents les plus célèbres, nous citerons celui qu'a construit Tschisnhausen, vers 1687 ; il est en cuivre, et assez mince pour n'être pas très

lourd ; son rayon de courbure est de $2^m,32$, et son ouverture de $1^m,74$. Au foyer, le bois s'enflamme instantanément ; l'eau, renfermée dans un vase en terre cuite entre bientôt en ébullition et disparaît en vapeur ; le cuivre, l'argent, fondent en quelques minutes ; l'ardoise se transforme en un verre noir que l'on peut tirer en fils ; la brique, la pierre ponce, les creusets, fondent et se vitrifient. Bernière a construit pour le roi, en 1757, un miroir concave en verre étamé, de $1^m,16$ d'ouverture, et au foyer duquel l'argent et même le fer fondaient en quelques secondes ; les cailloux se ramollissaient et coulaient comme du verre. On a fait de ces miroirs en bois verni ; on en a recouvert de lames de paille. Mariotte a enflammé de la poudre avec un miroir en glace obtenue au moyen d'eau bien purgée d'air, etc. On a construit aussi des miroirs ardents paraboliques ; le foyer est plus resserré, mais ils présentent l'inconvénient d'exiger que les rayons soient exactement parallèles à l'axe du paraboloïde, ce qui est incommode à cause du mouvement du soleil.

Les propriétés des miroirs ardents étaient connues des anciens. Tout le monde a entendu raconter comment Archimède incendiait, avec des miroirs ardents, les vaisseaux des Romains assiégeant Syracuse, et Proclus, en 514, ceux de Vitalien assiégeant Byzance. Depuis, ces faits ont été révoqués en doute, principalement par Descartes. On a remarqué que Polybe, 50 ans après Archimède, n'en fait pas mention. Il en est de même de Tite-Live et de Plutarque. Ce n'est que très longtemps après, que Zonaras et Tzetzès, dans le XIIe siècle, ont répandu cette histoire. Galien, plus près d'Archimède, dit bien que ce grand géomètre brûla les vaisseaux de l'ennemi, mais le mot *pyria* dont il se sert ne désigne pas spécialement un miroir ardent, mais simplement une *machine à feu*. Comme Archimède a traité des miroirs ardents et qu'il brûla la flotte, on a mêlé les deux faits. D'après les expressions de Zonaras [1], nous pensons que l'on peut admettre qu'Archimède se servait d'un miroir pour enflammer des matières incendiaires, qu'il lançait ensuite sur les vaisseaux. Le miroir ardent n'était qu'un moyen commode pour se procurer du feu. Il est bien vrai que Tzetzès décrit dans ses vers un appareil formé de miroirs plans, soutenus par des supports à charnière, et qu'Archimède disposait, dit-il, de manière à ce qu'ils fussent tangents à une même sphère. Mais ne peut-on pas voir là simplement le désir, facile à expliquer chez un poète, de rendre compte de la manière dont on dût opérer dans l'accomplissement d'un fait qu'il admet d'abord comme avéré. D'ailleurs n'y avait-il pas une foule de moyens de brûler des navires placés à une assez petite distance pour être à portée du foyer d'un miroir ?

Quoi qu'il en soit, la possibilité de l'opération attribuée à Archimède n'est plus douteuse aujourd'hui. Anthémius, architecte de l'église Sainte-Sophie de

[1] « Archimède, dit Zonaras, ayant reçu les rayons du soleil sur un *miroir*, à l'aide de ces » rayons rassemblés et réfléchis par l'épaisseur et le poli du miroir, il embrasa l'air et » *alluma une grande flamme qu'il lança tout entière sur les vaisseaux qui mouillaient* » *dans la sphère de son activité*....... »

Constantinople, après avoir discuté l'histoire d'Archimède, avait construit une machine composée de 24 miroirs plans qui pouvaient être dirigés de manière que les faisceaux réfléchis se croisaient en un même point, où il pouvait enflammer du bois. Il fit aussi tenir ces miroirs par des hommes, qui les dirigeaient à volonté. Plus tard, le P. Kircher guidé par la description de Tzetzès produisit avec cinq miroirs plans, une chaleur insupportable à une distance de 35 mètres.

Buffon a obtenu des effets beaucoup plus intenses; il ignorait les essais faits avant lui, et passe généralement pour l'inventeur des miroirs articulés. La machine qu'il construisit était composée de 100 miroirs plans en verre étamé, de 280 centimètres carrés environ, ajustés à charnière sur un châssis, de manière que l'ensemble formât une surface sphérique. Cette machine constituait un miroir concave à foyer variable. Avec cet appareil, Buffon fit fondre du plomb à 50 mètres de distance, et de l'argent à 35 mètres. Le bois s'enflammait à 80 mètres.

722. Réflexion diffuse. — Quand on détruit le poli d'un miroir concave, l'effet produit est considérablement affaibli. Ce résultat, constaté par Leslie, s'explique par la *diffusion* d'une partie de la chaleur par la surface dépolie. La diffusion consiste dans la réflexion de la chaleur, en chaque point du miroir, dans une foule de directions différentes; de manière que cette chaleur réfléchie ne passe pas au foyer, qui ne reçoit que la chaleur réfléchie *spéculairement*, c'est-à-dire par les parties de la surface qui ont conservé leur poli. Ce phénomène, signalé par Melloni, qui en a fait une étude particulière, est analogue à la réflexion diffuse de la lumière sur les surfaces non polies, en vertu de laquelle nous distinguons la forme et la couleur des objets éclairés.

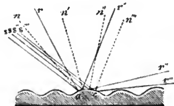


Fig. 553.

La chaleur diffuse provient, comme la lumière diffuse, de la réflexion qui se fait, suivant les lois ordinaires, sur le contour des aspérités qui recouvrent les surfaces dépolies, de manière que les rayons réfléchis marchent dans des directions très variables, à cause des directions aussi très différentes des normales aux divers points de la surface très petite d'une même aspérité. Cela se voit sur la *fig.* 553, dans laquelle s, s', s'', s''' représentent des rayons incidents parallèles; n, n', n'', n''' les normales aux points où ces rayons rencontrent une aspérité ac, représentée très grossie pour la rendre distincte; et r, r', r'', r''' les rayons réfléchis, qui se trouvent distribués dans l'espace angulaire rr'''.

§ 2. — PASSAGE DES RAYONS DE CHALEUR A TRAVERS LES CORPS. RÉFRACTION DE LA CHALEUR.

I. Pouvoir diathermane.

723. Substances traversées par les rayons calorifiques. — Il y a des substances qui peuvent être traversées de part en part par la chaleur rayonnante, sans l'arrêter pour s'échauffer à ses dépens. C'est ainsi que la chaleur traverse l'air qui nous sépare d'un foyer en activité. Les rayons calorifiques qui nous arrivent du soleil peuvent aussi passer à travers des lames de verre, en ne perdant que très peu de leur intensité. Ce fait était connu depuis des siècles; mais, pendant longtemps, on a cru que la *chaleur obscure*, et même la chaleur lumineuse émanant d'un corps faiblement incandescent, était arrêtée par une lame de verre. Mariotte avait reconnu, en effet, qu'une semblable lame empêche la chaleur venant du feu d'une cheminée et tombant sur un miroir sphérique, de produire son effet sur un thermomètre placé au foyer. De là l'explication de cette pratique, en usage dans les fonderies depuis un temps immémorial, qui consiste à ne regarder la matière en fusion qu'à travers une lame de verre, pour arrêter la plus grande partie des rayons calorifiques. Scheele arriva au même résultat que Mariotte. Cependant Pictet reconnut un effet sensible au foyer de l'un de ses miroirs conjugués (720), quand, au foyer de l'autre, il plaçait un vase plein d'eau bouillante séparé du premier miroir par un carreau de vitre. W. Herschell constata le passage de la chaleur rayonnante à travers certains corps, en plaçant simplement un thermomètre très près de la source calorifique, dont il était séparé par la lame à essayer.

Malgré ces expériences, la question resta longtemps douteuse. On prétendit que l'effet calorifique produit provenait de la chaleur absorbée par la lame interposée, qui, aprés s'être échauffée, rayonnait vers le thermométre. Mais P. Prevost[1] fit l'expérience avec une lame de glace, dans un espace dont la température était de -3°, et la chaleur franchit cet écran glacé et vint faire monter un thermoscope placé du côté opposé. En faisant marcher une lame de verre, de maniére à renouveler à chaque instant la partie qui était en face d'une ouverture pratiquée dans un écran placé devant un vase plein d'eau bouillante, il vit l'effet rester le même que lorsque la lame était en repos. Enfin, Prevost vit la chaleur rayonnante se transmettre à travers une nappe d'eau de $0^{mm},5$ d'épaisseur tombant verticalement, et dont l'échauffement ne pouvait évidemment avoir lieu. Le thermoscope indiquait environ $\frac{1}{2}$ degré,

[1] *Journal de physique* (1811), t. LXXII, p. 168.

quand sa boule était noircie, et que la source de chaleur était un morceau de fer brûlant, mais non lumineux. Delaroche a confirmé ces résultats par un moyen indiqué par Maycock : ayant recouvert de noir de fumée la face d'une lame de verre, tournée du côté de la source, la lame de verre s'échauffa davantage, et cependant le thermomètre placé du côté opposé ne monta plus, parce que le noir de fumée ne laissait pas passer la chaleur rayonnante. Enfin, Melloni a répété la plupart de ces expériences avec le thermo-multiplicateur, et il a ajouté un dernier argument aux preuves de l'existence de la transmission par rayonnement ; il constata que, dès qu'on enlève l'écran qui abrite la pile, l'aiguille du réomètre se met en mouvement, et atteint sa position d'équilibre dans un temps très court, qui est toujours le même, quelle que soit l'intensité de la source et l'épaisseur de la lame traversée par les rayons. Ce temps est encore le même quand cette lame est enlevée. De plus, si les rayons traversent plusieurs ouvertures en ligne droite avant de tomber sur la lame, dès qu'on place la base de la pile en dehors du faisceau incident prolongé, elle n'indique plus aucune élévation de température, de quelque manière qu'on dirige son axe, tandis que la lame, si elle rayonnait, devrait toujours lui envoyer plus ou moins de chaleur.

Il est donc bien prouvé aujourd'hui que la chaleur rayonne à travers certaines substances. Melloni a nommé *diathermanes* ou *diathermiques*, les substances qui peuvent ainsi être traversées par la chaleur rayonnante.

724. Banc de Melloni. — Melloni a fait un grand nombre d'expériences sur les *pouvoirs diathermanes* des corps, au moyen du thermo-multiplicateur ; quand on veut les répéter, on se sert de l'appareil nommé *banc de Melloni* (*fig.* 554). La règle LL supporte différentes pièces que l'on peut déplacer, et fixer au moyen de vis de pression. P est la pile thermo-électrique, et *r* le réomètre ; *a*, *a'* sont des écrans formés de deux ou trois lames de laiton, et pouvant tourner dans leur propre plan, de manière à s'abattre latéralement quand on veut découvrir la pile. *l*, *p*, *c* sont différentes sources de chaleur, que l'on emploie alternativement ; *l* est une lampe de Locatelli, à mèche rectangulaire et sans cheminée de verre ; *c* est un cube plein d'eau chaude, dont on entretient la température en plaçant au-dessous une lampe à alcool ; *p* est une hélice en platine, que l'on rend incandescente dans la flamme d'une lampe à alcool. L'écran *e* est muni d'une ouverture dont on fait varier la grandeur au moyen du disque *s* qui porte sur son pourtour des trous circulaires de grandeur différente, que l'on amène successivement au milieu de l'ouverture de l'écran, pour délimiter le faisceau qui tombe sur la pile. Enfin, le support *t* sert à soutenir les corps que l'on veut faire traverser par la chaleur rayonnante.

Pour évaluer la proportion de chaleur transmise à travers un corps placé à l'ouverture de l'écran *e*, on commence par disposer la source de chaleur à une distance telle que la déviation de l'aiguille du réomètre soit de 30° quand ses rayons tombent librement sur la base de la pile. On interpose ensuite l'écran *a'*, et l'on place la lame à l'ouverture de l'écran *e*. Quand la pile s'est

complétement refroidie, ce que l'on reconnaît à ce que l'aiguille du réomètre est revenue au zéro, on abat l'écran a', on voit alors l'aiguille du réomètre s'avancer graduellement, et l'on observe l'arc d'impulsion; d'où l'on conclut la déviation stable correspondante, puis l'intensité du rayonnement au moyen des tables (712). En comparant cette intensité à celle qui correspond aux rayons tombant librement sur la pile, on trouve la proportion de chaleur qui a traversé la lame diathermane. On représente ordinairement par 100 la quantité de chaleur envoyée directement à la pile, et l'on y rapporte la quantité de chaleur qui a traversé la lame. Par exemple, si les effets déduits des déviations successives de l'aiguille sont 35 et 14, on écrira $35 : 14 = 100 : x$ d'où $x = 86,66$. On exprime souvent ce résultat en disant que, sur 100 rayons de chaleur, la lame en a laissé passer 86,66, et en a arrêté 13,34.

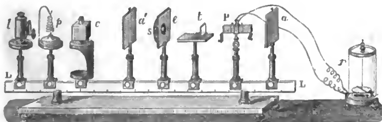


Fig. 554.

725. Influence du poli sur le pouvoir diathermane. — Ces préliminaires une fois posés, nous allons faire connaître les premiers résultats obtenus par Melloni[1]. Il a d'abord constaté que la quantité de chaleur qui traverse une lame diathermane est d'autant plus grande que ses faces sont mieux polies. Ayant pris huit fragments d'une même glace de 8mm,371 d'épaisseur, dont la face tournée vers la pile était polie, ou usée avec du sable, de l'émeri ou d'autres poudres dures, il trouva que la déviation du réomètre, qui était de 30° pour les rayons directs de la source, était de 19°,15 pour la lame la mieux polie, et de 5°,38 pour celle dont la face avait été altérée le plus complétement. La proportion de rayons calorifiques transmis est donc moindre, comme pour la lumière, quand la surface est moins polie.

726. Décroissement des pertes avec l'épaisseur. — Melloni a ensuite confirmé ce fait important découvert par de Delaroche, que les rayons qui ont traversé une lame éprouvent moins de perte proportionnellement, quand ils en traversent une autre de même substance. Delaroche se servait des miroirs conjugués; Melloni a employé le thermo-multiplicateur. Ce dernier physicien

[1] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. LIII, p. 5.

ayant pris quatre fragments d'une même glace, les réduisit à des épaisseurs proportionnelles aux nombres 1, 2, 3, 4, et il obtint les résultats suivants, en prenant pour source une *lampe d'Argant*, donnant directement une déviation de 30° :

ÉPAISSEURS des lames.	DÉVIATIONS.	RAYONS TRANSMIS sur 100.	RAYONS ARRÊTÉS sur 100.
2,068	21°,625	61,9	38,1
4,136	20,312	57,6	42,4
6,202	19,687	55,8	44,2
8,272	19,375	54,9	45,1

Supposons la lame la plus épaisse divisée par la pensée en quatre couches d'égale épaisseur; les quantités de chaleur qui se présentent pour traverser chacune d'elles sont

$$100, \qquad 61{,}9, \qquad 57{,}6, \qquad 55{,}8;$$

et les quantités arrêtées par les couches successives,

$$38{,}1, \quad 42{,}4-38{,}1=4{,}3, \quad 44{,}2-42{,}4=1{,}8, \quad 45{,}1-44{,}2=0{,}9.$$

En prenant le rapport avec la quantité qui se présente à chaque tranche, on obtient les nombres de plus en plus petits

$$0{,}381, \qquad 0{,}069, \qquad 0{,}031, \qquad 0{,}016.$$

Cette loi a été vérifiée jusqu'à des épaisseurs de 54^{mm}.

Cas des liquides. — Les liquides ont donné des résultats semblables. Six auges ayant deux faces parallèles formées par des lames de verre mince séparées par des intervalles variant de $6^{mm},767$ à $108^{mm},279$, furent remplies d'huile de colza, et placées successivement en face de l'ouverture de l'écran *e* (*fig.* 554); la lampe était approchée de manière à donner une déviation de 30° à travers chaque auge vide, et le décroissement des pertes s'est manifesté comme dans le cas des lames solides.

Si, comme le faisait Delaroche, on place à la suite les unes des autres des plaques de même substance et de même épaisseur, on arrive à la même conclusion; seulement les pertes diminuent moins rapidement, à cause de la chaleur qui se réfléchit à la face d'entrée et à la face de sortie de chaque lame. Avec

des lames de verre de 2^{mm},068 d'épaisseur, les pertes, rapportées à la quantité que recevait chaque lame, furent de 0,381, 0,134, 0,087, 0,058.

727. Pouvoir diathermane des différentes substances. — Prevost avait reconnu que l'eau et le verre ne laissent pas passer également la chaleur rayonnante. Delaroche avait aussi reconnu que du verre verdâtre en laissait passer une plus grande quantité que du verre limpide. Mais les épaisseurs n'étaient pas égales, de sorte qu'il restait quelque doute sur ces résultats. Melloni, par un grand nombre d'expériences, faites sur des substances de natures très diverses, a établi d'une manière indubitable que le pouvoir diathermane change notablement d'une substance à l'autre. Pour les liquides, il construisit des espèces d'auges, en taillant de larges échancrures dans un fragment d'une glace, et appliquant sur les deux faces des lames minces de verre qui adhéraient par juxta-position et qui étaient maintenues par un encadrement convenable. L'intervalle entre les deux lames était rempli du liquide à essayer. Voici une partie des résultats obtenus par Melloni, en se servant d'une *lampe d'Argant à cheminée de verre*. Il faut bien remarquer que les résultats pourraient être très différents si l'on employait d'autres sources, comme nous le verrons plus tard (733), mais il ne s'agit ici que de prouver que le pouvoir diathermane change avec la nature de la substance :

Verres incolores (épaisseur : 1^{mm},88).

Rayons directs	100	Verre à vitre	de 58 à 50
Flint-glass de div. qualités...	de 67 à 64	Crown anglais	49
Verre à glace	de 62 à 59		

Liquides (épaisseur : 9^{mm},21).

Sulfure de carbone.	63	Acide sulfurique pur	17
Chlorure de soufre (rouge brun)	63	Alcool absolu, acide nitrique	15
Huile de noix jaune, essence de téréb.	31	Hydrate d'ammoniaque	15
Huile de colza, d'olive	30	Hydrate de potasse	13
Naphte naturel.	28	Acide acétique rectifié	12
Essence de copahu, de lavande, huile d'œillette	26	Eau sucrée, salée, alunée	12
Ether sulfurique	21	Eau distillée, blanc d'œuf	11

Substances cristallisées (épaisseur : 2^{mm},62).

Sel gemme (diaphane)	92	Tourmaline verte (diaphane)	27
Spath d'Islande, quartz (diaphanes)	62	Chaux sulfatée (diaphane).	20
Quartz enfumé	57	Chaux fluatée (translucide)	15
Topaze du Brésil incolore.	54	Alun de glace	12
Carbonate de plomb (diaphane)	52	Sulfate de cuivre bleu foncé (diaphane)	0
Agate blanche (translucide)	35		

Dans les corps non cristallisés, le pouvoir diathermane augmente généralement avec le *pouvoir réfringent* pour la lumière, c'est-à-dire avec la propriété de dévier plus ou moins de leur direction les rayons lumineux qui passent de l'air dans la substance. Les corps cristallisés ne sont pas soumis à la même loi. On n'a reconnu aucune relation entre la forme des cristaux et le pouvoir diathermane. Ainsi, des lames taillées suivant différentes directions dans un cristal de quartz, ou de spath d'Islande, laissent passer la même proportion de rayons calorifiques. La structure des substances a pourtant une grande influence; car une plaque de sel marin ordinaire arrête tous les rayons de la lampe d'Argant, tandis qu'une lame de sel gemme en laisse passer 0,923. L'alun et le sel gemme laissent passer des quantités très différentes, 0,12 et 0,923, de la chaleur incidente, et de l'eau saturée de l'un ou de l'autre de ces sels en laisse passer la même quantité 0,12.

M. Wilhelmy avait cru que le verre était plus diathermane quand il est chaud que lorsqu'il est froid. La lame de verre chauffée dans une étuve était placée en face de la pile; on constatait : 1° l'effet de son rayonnement propre; 2° l'effet de ce rayonnement réuni à celui d'une lampe d'Argant envoyant ses rayons à travers la lame; 3° l'effet direct du rayonnement de la lampe. Mais MM. de la Provostaye et Desains n'ont trouvé aucune différence avec le verre et le sel gemme, froids ou à 150°.

La transparence des corps n'est pas en rapport avec leur pouvoir diathermane. Ainsi, l'eau, parmi les liquides, laisse passer le moins de chaleur rayonnante, et elle est plus diaphane que le chlorure de soufre et les huiles, qui en laissent passer beaucoup plus. Parmi les solides, l'alun, l'acide citrique, qui sont parfaitement transparents, laissent passer moins de chaleur, sous une épaisseur de 1^{mm},5, qu'une plaque de quartz enfumé de 86^{mm} d'épaisseur assez foncée pour qu'on ne puisse distinguer, à travers, les lettres d'une page imprimée en gros caractères et exposée au grand jour. Les rayons transmis à travers l'alun, ne donnant qu'une déviation de 6°, ceux qui traversent la plaque épaisse de quartz donnent encore 19°. Enfin, des lames de mica noir, complètement opaques, et de 0^{mm},9 d'épaisseur, laissent encore passer 0,20 des rayons de chaleur émanant d'une lampe de Locatelli, et des lames de verre noir de 1^{mm} d'épaisseur, à travers lesquelles on ne peut même distinguer le soleil, en laissent passer 0,26. La propriété de laisser passer la chaleur et celle de laisser passer la lumière paraissent donc indépendantes l'une de l'autre. De là la nécessité d'employer des termes différents pour les désigner. Nous avons dit que Melloni a nommé corps *diathermanes* ou *diathermiques* ceux qui se laissent traverser par les rayons de chaleur. Il nomme *athermanes* ou *athermiques* ceux qui, comme les métaux, le bois, ne laissent pas passer la chaleur.

[1] *Annales de Poggendorff* (1852) t. LXXVII, p. 217; et *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XLVII, p. 206.

Ces termes correspondent au mot *opaque* pour la lumière. Au mot *transparence*, Melloni oppose celui de *diathermanéité*.

728. Propriété du sel gemme. — Parmi les substances diathermanes, il faut distinguer le *sel gemme*. Cette substance possède la diathermanéité la plus prononcée; sur 100 rayons, elle en transmet 92,3, et ce qu'il y a surtout de remarquable, c'est que cette proportion reste la même, *quelle que soit l'épaisseur*. On en conclut que le sel gemme n'absorbe aucune portion de la chaleur incidente, et que la perte constante de 0,077 provient de la réflexion sur les deux faces de la lame. Cependant, d'après MM. de la Provostaye et P. Desains, le sel gemme absorbe une très faible partie des rayons des sources de basse température. Nous verrons plus loin d'autres propriétés curieuses de la même substance (735).

II. De la réfraction de la chaleur.

729. Nous avons supposé, dans ce qui précède, que les rayons de chaleur qui pénètrent dans un corps diathermane y entrent dans une direction normale à sa surface. Quand il en est autrement, chaque rayon de chaleur *sI* (*fig.* 555) est dévié, en restant dans le plan de l'angle d'incidence, d'une quantité qui dépend de la substance diathermane. Ainsi, au lieu de suivre la direction I*s'*, ce rayon prend une direction différente I*r*. Ce phénomène, qui a lieu aussi pour la lumière, se nomme *réfraction*. Le rayon I*r* est le *rayon réfracté*, et l'angle *n*I*r* est l'*angle de réfraction*. En général, le rayon réfracté se rapproche de la normale, quand le rayon passe dans un milieu plus dense que celui d'où il vient, et il s'en écarte dans le cas contraire. Ainsi, quand le rayon *r*I sort, en I, du corps solide diathermane pour rentrer dans l'air, il s'écarte de la normale *n*I, et prend la direction I*s*, au lieu de continuer dans la direction I*r'*.

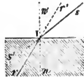


Fig. 555.

Les lois de la réfraction seront développées avec détail dans l'étude de la lumière. Ces lois doivent être regardées comme étant les mêmes pour les rayons de chaleur; car les phénomènes qui en sont les conséquences se manifestent de la même manière pour la chaleur que pour la lumière. Parmi ces phénomènes, il faut citer les effets des *prismes* et ceux des *lentilles*.

Prismes. — Un prisme, quand il s'agit de la réfraction, consiste en un milieu terminé par deux plans qui se coupent suivant une droite qu'on nomme le *sommet* du prisme. Un troisième plan parallèle à cette ligne termine le plus souvent le milieu, de manière à lui donner la forme du prisme triangulaire de la géométrie. Soit ABC (*fig.* 556), la section droite d'un prisme formé d'une substance diathermane, et *sI* un faisceau de rayons parallèles à cette section

droite, tombant sur la face AB. Chacun des rayons du faisceau sera dévié en se rapprochant de la normale *n*I. Arrivé en I′, le rayon sera dévié en s'écartant de la normale I′*n*′, et il en résultera que le rayon émergent I′*e* sera dévié du côté opposé au sommet A du prisme. Ce phénomène a été observé depuis longtemps avec les rayons calorifiques du soleil, mais on en contestait l'existence dans le cas de la chaleur obscure. Melloni a levé tous les doutes par l'expérience qui suit [1]. On place sur la règle LL de l'appareil (*fig.* 554), une seconde règle *ll*′ (*fig.* 557) qui porte la pile P. La règle *ll*′ est mobile autour d'un axe vertical porté par une pince que l'on fixe sur la règle L au moyen d'une vis de pression. Un support *lo* est placé sur le prolongement de cet axe, et l'angle que font les deux règles l'une avec l'autre est indiqué par l'index *i*, sur une division tracée sur le contour du plateau *o*. Sur ce plateau

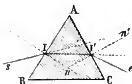


Fig. 556.

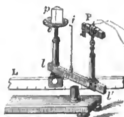


Fig. 557.

est fixé verticalement un prisme *p* en *sel gemme*. Un faisceau de rayons, émanant d'un vase plein d'eau bouillante, et circonscrit par un écran percé, rencontre le prisme, est dévié en le traversant, et vient tomber sur la pile, quand on lui a donné une position convenable en tournant peu à peu la règle *ll*′. Si l'on enlève alors le prisme, l'aiguille du réomètre qui avait été déviée, revient au repos; il en est de même si l'on retourne le prisme d'une demi-circonférence, de manière que son arête de sommet change de position; ce qui montre que l'effet produit sur la pile n'est pas dû à de la chaleur rayonnée par le prisme qui se serait d'abord échauffé.

730. Propriétés des lentilles. — On nomme *lentille* un milieu terminé par deux surfaces sphériques. La droite qui passe par les centres de ces surfaces forme l'*axe* de la lentille. Soit *mn* (*fig.* 558), la section faite par un plan passant par son axe *sf*, d'une lentille à faces convexes en *sel gemme*, et supposons que chacune de ces faces ne soit qu'une portion très petite de la sphère à laquelle elle appartient; Melloni a reconnu par l'expérience que, si l'on place un point échauffé *s* assez loin de cette lentille, et sur son axe, les rayons, après l'avoir traversée, se rassemblent en un foyer *f* où l'on reconnaît une

[1] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. LV, p. 365.

élévation notable de température, qui ne se manifeste plus dès que l'instrument thermométrique est hors du foyer. Ce phénomène est une conséquence des lois de la réfraction, et peut s'en déduire par le raisonnement, comme nous l'établirons dans l'optique. Si les rayons incidents *s'*, *s'* sont parallèles à l'axe de la lentille, le foyer formé F se nomme *foyer principal*. Si le point rayonnant est placé au foyer principal F, les rayons qui traversent la lentille sortent parallèlement à son axe.

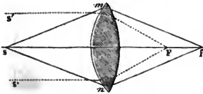


Fig. 558.

On savait depuis des siècles que les rayons calorifiques du soleil se concentrent, avec la lumière, au foyer principal des lentilles de verre; mais on regardait la lumière qui accompagne ces rayons comme nécessaire au phénomène. Scheele croyait même que la chaleur du feu ne donne aucune élévation de température au foyer des lentilles. Depuis, Herschell et Brande ont obtenu des effets marqués en prenant pour sources des flammes ou des solides incandescents. Melloni, le premier, a réussi avec la chaleur obscure, au moyen de lentilles en sel gemme.

731. Verres ardents. — Un verre ardent n'est autre chose qu'une lentille de verre ou de toute autre substance diathermane, destinée à concentrer à son foyer les rayons parallèles du soleil. Cet instrument était connu des anciens; les vestales s'en servaient pour allumer le feu sacré; les Romains en faisaient usage pour cautériser et pour se procurer du feu, comme il ressort d'un passage de la comédie des *Nuées* d'Aristophane [1]. Avec des lentilles de 5 ou 6 centimètres on peut brûler du bois, et en leur donnant une grande ouverture, et en même temps un grand rayon aux deux surfaces sphériques, pour qu'elles ne comprennent qu'un petit nombre de degrés, on obtient au foyer des effets d'une intensité remarquable, et supérieurs à ceux que produisent les miroirs ardents (721). Parmi les verres ardents les plus célèbres, on cite ceux de Tchirnhausen, ayant près d'un mètre de diamètre. Toutes les matières combustibles s'enflamment instantanément au foyer; les matières terreuses sont vitrifiées; les métaux, l'or même, sont fondus.

Lentilles à échelons. — Une partie de la chaleur est absorbée par le verre de la lentille, qui est très épais au milieu. Pour éviter cet inconvénient on se sert de *lentilles à échelons* (*fig.* 559): une des faces est plane, et sur l'autre face, les différentes parties de la surface sphérique sont rentrées les unes par

[1] « Avez-vous vu, chez les droguistes, la belle pierre transparente dont ils se servent pour allumer du feu? — Veux-tu dire le verre? — Oui. — Eh bien! qu'en feras-tu? — Le voici: Je prendrai le verre, et me mettant ainsi au soleil, je fondrai de loin toute son écriture (scène 1, acte 2). »

rapport aux autres, comme on le voit dans la coupe *aoa*, de manière que l'ensemble est composé de couronnes *aa*, *bb*, qui entourent une lentille centrale *o*. Indépendamment de la diminution d'épaisseur obtenue par cette disposition, on y trouve encore l'avantage de pouvoir donner aux différentes couronnes, des courbures telles que les rayons réfractés se réunissent constamment au même point. L'idée des lentilles à échelons est due à Buffon; mais il ne put en construire. Condorcet, dans son éloge du grand naturaliste, proposa de les former de plusieurs pièces de verre. Brewster appliqua le premier cette idée heureuse, en 1811, et forma un verre ardent de $1^{m},52$ de diamètre, le plus grand que l'on connaisse. Fresnel, vers 1820, en cherchant à appliquer les lentilles à l'éclairage des phares, imagina de son côté, et sans avoir eu connaissance des travaux antérieurs, les lentilles composées de plusieurs pièces, et les nomma ***lentilles polyzonales***.



Fig. 559.

Buffon a aussi imaginé de former des verres ardents avec des liquides. Deux lames de verre ayant une courbure sphérique, comme un verre de montre, étaient réunies par leur contour, et la capacité ainsi formée était remplie de liquide. Un orifice pratiqué à la partie supérieure était surmonté d'un vase qui recevait l'excès du liquide, que la chaleur du soleil faisait dilater; mais il ne réussit qu'imparfaitement. Depuis, Bernières et Trudaine construisirent une lentille à liquide, ayant $1^{m},33$ de diamètre, et dont les surfaces sphériques avaient $2^{m},66$ de rayon. Rempli d'essence de térébenthine, cet appareil a produit des effets d'une intensité prodigieuse. Quand on veut rendre ces effets encore plus énergiques, on reçoit le cône de rayons émergents sur une seconde lentille, afin de resserrer davantage les rayons de chaleur, qui s'étendent dans un espace qui dépend du diamètre apparent du soleil et de la distance du foyer à la lentille.

Des ballons de verre remplis d'eau, des carafes de forme à peu près sphérique, peuvent aussi concentrer les rayons solaires en un foyer où l'on peut brûler des matières combustibles. On peut encore construire des lentilles avec de la glace: en 1763 on a fait, en Angleterre, des expériences curieuses, au moyen d'une lentille de glace ayant plus de 3 mètres de diamètre; on put à son foyer enflammer de la poudre, du papier et d'autres matières combustibles.

Scoresby en a construit plus d'une fois dans ses voyages aux mers polaires, avec lesquelles il enflammait diverses substances, au grand étonnement de ses matelots.

§ 3. — DE LA THERMOCHROSE.

I. Thermochrôse des rayons calorifiques.

732. Nomenclature. — Il existe différentes espèces de rayons lumineux, qui se distinguent les uns des autres par la *couleur*; et l'on démontre en optique que la lumière blanche est composée d'un mélange des différents rayons colorés, en proportions déterminées, et qu'on peut en séparer par divers moyens ; par exemple en faisant passer cette lumière à travers des lames de verre de différentes nuances, qui la tamisent pour ainsi dire, et ne laissent passer que les rayons de la couleur de la lame. Les rayons colorés passent tous avec la même facilité à travers les lames transparentes *incolores*, mais ils sont interceptés par des lames de substances colorées, en proportion variable suivant leur nuance. Nous allons voir que ces phénomènes se produisent de la même manière avec la chaleur, et qu'il existe des rayons calorifiques de différentes qualités comme des rayons lumineux de différentes couleurs.

Dans un Mémoire publié en 1811, Delaroche, après avoir montré que la chaleur qui a traversé une lame, éprouve proportionnellement moins de perte en en traversant une seconde, a prouvé que la proportion de chaleur qui traverse une lame varie avec la nature de la source qui fournit les rayons calorifiques ; d'où il a conclu *qu'il devait exister des rayons de chaleur de différente espèce* [1]. Cette découverte importante a été confirmée par des expériences multipliées de Melloni, qui en a considérablement étendu le champ, a ajouté un grand nombre de faits nouveaux et en a développé les conséquences dans plusieurs Mémoires très remarquables. A la suite de ces nombreuses recherches, Melloni a senti la nécessité d'adopter des termes particuliers pour exprimer les faits, sans emprunter les dénominations dont on se sert pour la lumière, lesquelles ne s'adaptent pas dans tous les cas aux phénomènes calorifiques. C'est ainsi que le mot *transparent* et le mot *diathermane* ne peuvent se remplacer mutuellement, puisque certaines substances non transparentes sont diathermanes et vice-versâ (727). Voici les termes adoptés par Melloni ; nous avons mis en regard ceux qui leur correspondent dans le cas de la lumière :

[1] *Journal de physique* (1812), t. LXXI, p. 201.

Chaleur.	Lumière.	Chaleur.	Lumière.
Thermochroïque.	coloré.	*Diathermane* ou *diathermique*.	transparent ou diaphane.
Athermochroïque.	incolore.		
Leucothermique.	blanc.	*Adiathermane*.	opaque.
Mélanothermique.	noir.	*Thermochrôse*.	coloration.

Cela posé, nous allons décrire les faits qui ont conduit à admettre les propriétés de la chaleur, que suppose cette nomenclature.

733. Absorption des rayons suivant la source. — Quand des rayons de chaleur qui traversent une même lame diathermane proviennent de sources différentes, la proportion que la lame laisse passer n'est pas la même. Melloni a mis ce fait en évidence, dans une suite d'expériences faites au moyen de quatre sources différentes : une lampe de Locatelli *l* (*fig.* 554), une spirale de platine *p*, rendue incandescente dans la flamme d'une lampe à alcool ; une lame de cuivre noircie portée à une température constante de 300° à 400° par la flamme d'une semblable lampe placée par derrière (*fig.* 560) ; et enfin un cube rempli d'eau bouillante. Voici quelques-uns des résultats obtenus avec ces différentes sources, placées à des distances de la pile convenables pour produire, par rayonnement direct, une déviation de 30°. Les nombres du tableau représentent les nombres de rayons transmis, sur 100 (724).



Fig. 560.

ÉPAISSEUR COMMUNE des plaques : $2^{mm},6$.	LAMPE de Locatelli.	PLATINE incandescent.	CUIVRE noirci à 390°	CUIVRE noirci à 100°
Sel gemme pur.	92	92	92	92
Sel gemme louche.	65	65	65	65
Spath d'Islande	39	28	6	0
Verre à glace.	39	24	6	0
Cristal de roche.	38	28	6	0
Tourmaline verte.	18	16	3	0
Sulfate de chaux.	14	5	0	0
Acide citrique	11	2	0	0
Alun.	9	2	0	0
Glace très pure.	6	0	0	0

On reconnaît à l'inspection de ce tableau que, le sel gemme excepté, le nombre de rayons transmis est d'autant plus petit que la température absolue de la source est moindre. Sous l'épaisseur de $2^{mm},6$, tous les rayons de la source à 100° sont absorbés. Remarquons encore que l'ordre des transmissions n'est pas toujours le même pour les différentes sources ; ainsi, le cristal de

roche, qui transmet moins de chaleur que le spath d'Islande et le verre à glace quand les rayons proviennent d'une lampe de Locatelli, en laisse passer autant que le premier de ces corps et plus que le second, quand les rayons proviennent du platine incandescent, et autant que ces deux corps, quand ces rayons proviennent du cuivre à 390°.

Les liquides présentent des phénomènes analogues. Comme la chaleur absorbée par les deux lames de verre entre lesquelles on les place, varie avec la source, pour reconnaître qu'il en est de même pour le liquide interposé, il suffit de remarquer que les quantités absorbées avec les différentes sources sont toutes plus grandes que celles qui sont absorbées par les lames de verre seules. Pour les couches liquides très minces, Melloni remplaçait ces lames par des lames de sel gemme ; ce qui peut se faire, même dans le cas de l'eau, le pouvoir diathermane de l'eau saturée de sel et contenue entre deux lames de verre, étant sensiblement égal à celui de l'eau pure.

Nous avons supposé que l'épaisseur des lames était la même. Si cette épaisseur va en augmentant, l'absorption est de plus en plus prononcée, de sorte que les différences sont plus tranchées quand, avec une même substance, on change de source; mais on remarque aussi que la quantité absorbée croît moins rapidement que l'épaisseur (726). Ces divers résultats se voient dans le tableau qui suit :

ÉPAISSEUR en millimètres.	VERRE de Saint-Gobain.			CRISTAL de roche limpide.			CRISTAL de roche enfumé.			HUILE de colza.		EAU distillée.	
	Lampe de Locatelli.	Platine incandescent.	Cuivre à 400°.	Lampe de Locatelli.	Platine incandescent.	Cuivre à 400°.	Lampe de Locatelli.	Platine incandescent.	Cuivre à 400°.	Lampe de Locatelli.	Platine incandescent.	Lampe de Locatelli.	Platine incandescent.
0,5	77,5	62,1	14,4	78,6	69,5	14,7	81,7	70,0	15,4	64,0	32,0	25,1	8,7
1,0	73,3	51,5	9,9	76,8	65,1	11,3	78,6	65,0	12,3	48,3	22,7	19,3	5,7
1,5	70,4	46,1	6,7	74,8	62,5	9,7	»	»	»	41,0	18,6	16,0	4,2
2,0	68,2	42,8	5,0	73,3	60,6	8,7	75,1	60,3	9,2	36,1	16,3	13,9	3,2
2,5	66,5	»	»	72,5	»	»	»	»	»	32,7	»	»	»
3	65,3	38,3	2,9	71,8	57,6	7,3	73,1	57,4	7,8	30,6	13,6	11,4	2,0
4	63,4	35,8	2,0	70,8	55,3	6,6	71,4	54,8	7,0	27,8	12,0	10,0	1,5
6	60,9	32,3	1,4	69,8	51,4	5,4	»	»	»	23,9	9,8	8,6	1,0
8	59,2	29,6	1,1	69,3	48,5	4,6	»	»	»	21,8	8,1	8,0	0,6
10	»	»	»	»	»	»	»	»	»	21,7	7,1	7,7	0,4
11	»	»	»	»	»	»	»	»	»	20,9	6,7	7,7	0,3
50	»	»	»	»	»	»	»	»	»	12,5	2,1	2,4	0
86	»	»	»	»	»	»	59,0	35,0	0,7	»	»	»	»
100	»	»	»	»	»	»	»	»	»	8,1	1,2	1,3	0
150	»	»	»	»	»	»	»	»	»	6,1	»	0,7	0
200	»	»	»	»	»	»	»	»	»	5,3	»	»	»

Les résultats contenus dans ce tableau ont été corrigés de la perte due aux réflexions qui ont lieu sur les deux faces des lames; tous n'ont pas été obtenus directement par l'expérience, l'épaisseur n'ayant pas toujours été exactement celle qui est indiquée; mais en comparant des résultats donnés pour des épaisseurs peu différentes, on a calculé, par interpolation, ceux qui correspondent à l'épaisseur indiquée.

734. Thermochrôse. — Pour expliquer les propriétés qui précèdent, il est nécessaire d'admettre, comme l'avait déjà fait Delaroche (732), qu'il y a différentes espèces de rayons de chaleur; car les rayons lancés par différentes sources ne jouissent pas des mêmes propriétés par rapport à la transmission à travers une même lame diathermane, et cela aussi bien pour la chaleur obscure que pour celle qui est accompagnée de lumière; de même que les rayons lumineux de différentes couleurs passent en proportions différentes à travers une lame de verre bleu ou rouge.

Il y a des substances qui laissent passer en plus grande proportion les rayons venant des sources les plus faibles. Tel est le sel gemme recouvert de noir de fumée, ou plutôt une couche de noir de fumée, car le sel gemme ne fait que soutenir cette couche, à travers laquelle la transmission suit les lois ordinaires des transmissions (726); seulement les sources les plus chaudes sont celles dont les rayons sont le plus absorbés. On peut donc dire que, en général, les rayons émanant des sources les plus intenses éprouvent, en passant à travers les lames, moins de perte que ceux qui émanent des sources les plus faibles, mais on voit que le contraire peut avoir lieu.

Il résulte aussi d'expériences de MM. de la Provostaye et Desains [1], que des sources à la même température peuvent émettre des rayons inégalement absorbés. Ayant recouvert la moitié d'une des faces d'un vase cubique, d'une couche de *cinabre*, et l'autre moitié de *noir de fumée*, ils le remplirent d'huile à 173°. Le rapport des rayonnements directs des deux surfaces fut égal à 0,83; et quand les rayons eurent traversé une lame très mince de verre, le rapport ne fut plus que 0,67, les rayons partant du cinabre étant absorbés en plus grande proportion. L'or et l'oxyde de cuivre, à la température du rouge naissant, émettent aussi des rayons de nature très différente; ceux de l'oxyde contiennent des éléments lumineux plus nombreux, car leur éclat est décuple.

Le mot *thermochrôse* sert à désigner cette qualité particulière aux rayons, qui les rend plus ou moins transmissibles à travers une même substance diathermane. Un faisceau ou *flux* de chaleur doit être considéré comme formé d'un *mélange de rayons de différentes espèces*, et sa composition dépend de la nature de la source d'où il émane. Chaque substance diathermane intercepte de préférence certains de ces rayons, de sorte que la perte dépend de la composition du faisceau, c'est-à-dire de la nature de la source; et les différentes substances interceptent en proportion différente les rayons d'une même source,

[1] *Comptes-rendus des séances de l'Académie des sciences* de Paris, t. XXXIV, p. 951.

suivant la manière dont elles sont *thermochroïques*; de même que des lames de verre coloré interceptent plus ou moins les rayons d'une même couleur, suivant qu'elles possèdent une nuance ou une autre.

Le sel gemme est athermochroïque. — Le sel gemme pur présente une particularité remarquable : il n'absorbe aucune portion de la chaleur incidente, quelle que soit son épaisseur, et *quelle que soit l'origine de cette chaleur.* Quand il n'est pas tout à fait limpide, il absorbe un peu de chaleur, et la même proportion pour les différentes sources. Il se comporte donc pour la chaleur comme les substances transparentes et *incolores* par rapport à la lumière ; il est *athermochroïque* (732), tandis que le cristal de roche, l'alun, le spath d'Islande... sont thermochroïques, et comparables aux verres colorés, relativement à la lumière ; ils ne laissent pas passer en même proportion les rayons calorifiques de différente *thermochrôse.*

Cette théorie, développée par Melloni avec une rare habileté, explique pourquoi la chaleur qui a traversé une première lame diathermane éprouve moins de perte, proportionnellement, en en traversant une seconde de même substance (726). En effet, le faisceau qui se présente à la seconde lame a été dépouillé dans son passage à travers la première, de la plus grande partie des rayons que cette substance peut intercepter. Il en est de même de la lumière qui a traversé un verre coloré ; elle traverse très facilement ensuite une lame de la même couleur ; mais si la seconde lame était d'une couleur différente, la lumière éprouverait une perte proportionnellement beaucoup plus grande, étant composée de rayons d'une nuance que la seconde lame a la propriété d'absorber.

735. Transmission à travers plusieurs lames différentes. — Cette dernière conséquence a aussi lieu pour la chaleur. Melloni a constaté que les rayons qui ont traversé une certaine plaque, éprouvent, en en traversant une seconde, des pertes qui varient avec la nature de celle-ci. Si la seconde lame restant la même, on change celle que traverse d'abord la chaleur, la perte à travers la seconde lame varie encore. Ces résultats se voient dans le tableau suivant, dans lequel sont indiqués les nombres de rayons, sur 100 de chaleur incidente, qui sont transmis à travers des lames de $2^{mm},6$ d'épaisseur, après que ces rayons ont traversé d'autres substances dont les noms sont inscrits en tête des colonnes.

Les résultats inscrits dans ce tableau restent les mêmes si l'on met les deux plaques traversées par les rayons à la place l'une de l'autre, en ne changeant pas la position de la source. Si l'on avait plus de deux plaques, l'ordre dans lequel on les placerait n'aurait pas non plus d'influence[1]. Il faut conclure de là, que chaque rayon d'une certaine espèce se comporte de la même manière dans toutes les lames qu'il traverse, sauf les pertes éprouvées dans son intensité.

[1] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. LV, p. 337.

SUBSTANCES placées immédialement avant la pile.	RAYONS directs de la lampe de Locatelli.	SUBSTANCES que la chaleur a d'abord traversées.				
		ALUN. ép., $2^{mm},6$	SULFATE de chaux. ép., $2^{mm},6$	CHROMATE de potasse. ép., $2^{mm},6$	VERRE vert. ép., $1^{mm},85$	VERRE noir. ép., $1^{mm},85$
Sel gemme.	92	92	92	92	92	92
Spath d'Islande.	39	91	89	56	50	55
Verre (épaisseur, $0^{mm},5$).	54	90	85	68	87	80
Cristal de roche.	38	91	85	52	78	54
Mica noir (épais., $0^{mm},9$).	20	0,4	12	16	38	43
Tourmaline verte.	18	1	10	14	24	30
Sulfate de chaux.	14	59	54	22	9	15
Acide citrique.	11	88	52	16	3	2
Alun.	9	90	47	15	0,5	0,3

736. Il résulte de l'inspection du tableau, que le sel gemme laisse passer la même proportion de rayons calorifiques, quelles que soient les lames que le flux de chaleur a d'abord traversées, ce qui prouve de nouveau qu'il est athermochroïque. Le mica noir ne laisse passer que 0,004 de la chaleur qui a traversé l'alun, et 0,43 de celle qui a traversé du verre noir. L'acide citrique, au contraire, ne laisse passer que 0,02 de la chaleur qui vient du verre noir, et 0,88 de celle qui a traversé l'alun, etc. En comparant ces faits avec ceux qui se passent quand la lumière traverse différents verres de couleur, nous dirons que l'alun et l'acide citrique ont à peu prés la même *thermochrôse*, et que le mica noir et l'alun ont, au contraire, des *thermochrôses* très différentes l'une de l'autre. Les verres différemment colorés ont généralement la même thermochrôse, car la chaleur qui a traversé un de ces verres passe en grande proportion à travers un autre. Le verre noir lui-même modifie le faisceau qui le traverse, de manière qu'il passe facilement à travers une lame de verre limpide, tandis que cette lame ne laisse passer que très peu des rayons qui ont traversé le sel gemme recouvert de noir de fumée.

Le verre coloré en vert avec de l'oxyde de cuivre fait exception ; il n'a pas la même thermochrôse que les verres de même nuance colorés avec d'autres substances, et, de plus, il est à peine diathermane, tellement que, si l'on concentre les rayons du soleil au moyen d'une lentille et qu'on interpose une lame de cette sorte de verre, la lumière présente au foyer un éclat très vif, mais la pile thermo-électrique n'indique aucune élévation de température, pour peu que la lame soit épaisse.

737. Loi d'absorption dans une lame diathermane. — M. Biot a trouvé cette loi de la manière suivante[1] : considérons d'abord un seul rayon

[1] *Mémoires de l'Académie des sciences de l'Institut*, t. XIV, p. 466.

d'une certaine espèce, d'intensité I, et tombant normalement sur une plaque diathermane. Une partie de ce rayon sera réfléchie à la surface d'entrée, ce qui diminuera l'intensité dans le rapport r, de sorte que l'intensité de la portion introduite sera $\mathrm{I}\,(1-r)$, quantité sur laquelle s'exercera la propriété absorbante. La fraction de cette chaleur qui ne sera pas absorbée, sera une certaine fonction inconnue $\varphi\,(e)$ de l'épaisseur e. L'intensité du rayon, quand il se présentera à la seconde surface, sera donc $\mathrm{I}\,(1-r)\,\varphi\,(e)$. Là il se fera une nouvelle réflexion, qui arrêtera une fraction r' de la chaleur qui se présente pour sortir; de sorte que l'intensité du rayon sera

$$\mathrm{I}\,(1-r)\,(1-r')\,\varphi\,(e). \qquad [1]$$

Si une seconde plaque de même substance que la première, et d'épaisseur e', est traversée par le rayon, l'intensité du rayon transmis à travers les deux plaques sera, à sa sortie,

$$i = \mathrm{I}\,(1-r)^2\,(1-r')^2\,\varphi\,(e)\,\varphi\,(e'). \qquad [2]$$

Supposons maintenant que le même rayon traverse une lame, toujours de même substance, et d'épaisseur $e+e'$; l'intensité du faisceau émergent sera, d'après la formule [1],

$$i' = \mathrm{I}\,(1-r)\,(1-r')\,\varphi\,(e+e').$$

Or, l'expérience montre que l'on a $i = (1-r)\,(1-r')\,i'$, c'est-à-dire que l'absorption est la même dans les deux plaques, séparées ou réunies en une seule; le facteur $(1-r)\,(1-r')$ représentant la perte éprouvée aux deux faces de plus, quand les lames sont séparées. On a donc

$$\varphi\,(e+e') = \varphi\,(e)\,\varphi\,(e').$$

Or, cette égalité ne peut subsister, comme l'a démontré Poisson, qu'en posant $\varphi\,(e) = a^e$, a étant une constante qui dépend de la nature de la plaque et de celle du rayon calorifique, et l'on a bien alors $\varphi\,(e)\,\varphi\,(e') = a^e \times a^{e'} = a^{e+e'}$. L'intensité du rayon qui sort d'une lame d'épaisseur e est donc

$$i = \mathrm{I}\,(1-r)\,(1-r')\,a^e \qquad [3]$$

équation qui représente une *logarithmique*. On voit que l'intensité d'un *rayon qui traverse une plaque, varie en progression géométrique quand l'épaisseur croît en progression arithmétique*. La raison a de la première progression dépend de la nature de la lame et de celle du rayon incident. On la nomme *coefficient de transmission*; elle représente la quantité de chaleur transmise, par une épaisseur de 1^{mm}. La valeur de a est plus petite que 1; car $a = 1$ suppose que la quantité transmise est égale à la quantité qui entre, comme pour le sel gemme, et $a = 0$ correspond au cas d'une transmission nulle. Plus a est petit, moins la substance est diathermane.

Les quantités absorbées par les tranches successives forment aussi une progression géométrique décroissante; car la quantité absorbée par la première tranche est, en appelant I' la quantité qui n'a pas été réfléchie, $I' - I'a = I'(1-a)$; pour la seconde, ce sera $I'a - I'a \cdot a = I'a(1-a)$; pour la troisième $I'a^2(1-a)$.... ; et $I'a^{n-1}(1-a)$ pour la n^e.

Ces lois ont été vérifiées par l'expérience, particulièrement par MM. Masson et Jamin.

Considérons maintenant un faisceau composé de rayons calorifiques de différentes thermochrôses, et ayant les intensités I, I', I''..., et soient a, a', a''... les *coefficients de transmission* qui leur correspondent dans une certaine lame diathermane d'épaisseur e; l'intensité i'' du faisceau à sa sortie, sera la somme des intensités de chaque rayon en particulier, et l'on aura

$$i'' = (1-r)(1-r')[Ia^e + I'a'^e + I''a''^e + \ldots.] \quad [4]$$

On voit que cette intensité dépend de la composition du faisceau incident, et par conséquent de la nature de la source; elle change aussi avec les valeurs de a, a', a''.... qui dépendent de la nature de la lame traversée. On voit encore que le faisceau émergent sera composé autrement que le faisceau incident, et que sa composition dépendra de l'épaisseur; conséquences conformes aux expériences de Melloni.

Nous trouverons des résultats semblables en étudiant l'absorption de la lumière par les milieux diaphanes.

738. Différente réfrangibilité des rayons de chaleur. — Les rayons lumineux de différente couleur sont différemment réfrangibles; par exemple, ils sont plus ou moins déviés en traversant un même prisme. Il en est de même des rayons de différentes thermochrôses. Pour le prouver, Melloni a construit une pile dont tous les barreaux étaient dans un même plan, de manière que les soudures d'un même côté formaient une ligne droite. Cette pile ayant été mise à la place de celle de la *fig.* 557, il fit tomber sur le prisme, un faisceau de rayons, délimité par son passage à travers une fente verticale étroite pratiquée dans un écran, et plaça la pile de manière à obtenir le maximum d'effet. Ayant changé ensuite la source, il reconnut que l'angle formé par la règle *ll'* (*fig.* 557) avec la règle L était d'autant plus grand que la source possédait une température plus élevée. Comme les rayons qui partent des sources les plus intenses sont généralement le plus facilement transmis (734), on voit que les rayons les plus transmissibles sont aussi ceux qui sont le plus déviés, c'est-à-dire qui sont le plus réfrangibles. En conservant la même source, mais en faisant passer les rayons, avant leur incidence sur le prisme, à travers des lames qui modifient le flux calorifique (736), on obtient encore des déviations différentes. Il y a donc toujours une analogie frappante avec les phénomènes lumineux.

739. Décomposition de la chaleur par réfraction. — On sait, depuis Newton, que la lumière blanche est composée d'une infinité de rayons colorés doués de réfrangibilités différentes. Il résulte de là que si l'on fait passer un pinceau cylindrique de rayons solaires, *s* (*fig.* 561) à travers un prisme A, les divers rayons colorés qui le composent étant différemment déviés, se trouveront séparés les uns des autres. Le faisceau sera donc étalé dans un plan perpendiculaire aux arêtes du prisme, et il formera sur un écran éloigné une image allongée *rv*, présentant de vives couleurs. Parmi ces couleurs on en a distingué *sept* principales, qui sont, en commençant du côté de l'arête A du prisme : *rouge*, *orangé*, *jaune*, *vert*, *bleu*, *indigo*, *violet*. L'image colorée *rv* se nomme *spectre solaire* ; et le phénomène qui lui donne naissance coustitue la *dispersion* ou la *décomposition* de la lumière, dont nous ferons une étude détaillée dans l'optique.

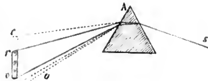


Fig. 561.

Spectre calorifique. — En même temps que la lumière, les rayons de chaleur solaire sont aussi déviés par le prisme, et éprouvent la décomposition, à cause de l'inégale réfrangibilité de ceux qui ne sont pas de même thermochrôse. En effet, on trouve de la chaleur dans les différents points du spectre lumineux, et même dans l'espace obscur *rc* qui s'étend au-delà du rouge. Il y a donc un *spectre calorifique*, comme il y a un spectre lumineux. Autrefois, on croyait que la partie la plus brillante du spectre était aussi la plus chaude, et l'on regardait la chaleur lumineuse comme produite par les mêmes rayons que la lumière, dont elle n'était ainsi qu'un attribut. Mais W. Herschell, ayant placé de petits thermomètres aux différents points du spectre formé par un prisme en flint-glass, trouva le maximum de chaleur dans la partie obscure au-delà du rouge, et il démontra l'indépendance des spectres calorifiques et lumineux. On tomba alors dans un excès contraire, et l'on regarda les rayons de chaleur comme tout à fait différents des rayons de lumière.

740. Effets de l'absorption des divers rayons par le prisme. — W. Herschell avait trouvé le maximum de chaleur au-delà du rouge ; d'autres observateurs le trouvèrent dans le jaune, dans le rouge, etc. En 1828, M. Seebeck montra que tous ces résultats sont exacts, et que la position du maximum dépend de la substance du prisme. Par exemple, avec des prismes *d'eau*, *d'acide sulfurique concentré*, de *crown-glass*, de *verre à glace*, de *flint-glass*, le maximum se trouve dans le *jaune*, l'*orangé*, le *rouge moyen*, le *rouge sombre*, l'*espace obscur* qui suit le rouge.

Melloni a reconnu que ces changements de position du maximum, proviennent de l'absorption en différentes proportions des rayons de diverses réfrangibilités, par les prismes de différente nature. Pour mettre ce fait en évidence,

il prend un prisme de crown, qui donne le maximum dans le rouge, et il isole, au moyen d'un écran percé, un pinceau de rayons violets, puis un pinceau de rayons obscurs pris du côté opposé du maximum, et dont la température, donnée par le thermo-multiplicateur, soit la même que celle du faisceau violet; il place ensuite une lame d'eau sur le chemin de ces deux faisceaux *isothermes*, et il trouve que le faisceau violet est à peine affaibli, tandis que l'autre est complètement intercepté. Un faisceau bleu et son isotherme donnent des résultats semblables ; seulement, l'eau laisse passer un peu du second et absorbe une petite portion du premier. Des expériences faites sur les autres couleurs ont montré que la portion absorbée dans le faisceau calorifique qui est du côté du violet, et la portion qui passe dans son isotherme, sont d'autant plus grandes que les distances des faisceaux au maximum sont plus petites, c'est-à-dire que la température de ces faisceaux est en général plus grande. Les rayons calorifiques les plus absorbés proportionnellemnt sont les moins réfrangibles, et le maximum s'approche d'autant plus du violet que la substance du prisme est moins diathermane, et que l'épaisseur traversée par les rayons est plus considérable.

Ces résultats expliquent le déplacement du maximum quand on change de prisme. Ainsi, avec un prisme d'eau, les rayons calorifiques ayant la même réfrangibilité que le rouge, étant plus absorbés que ceux qui correspondent au jaune, le maximum de chaleur descend dans cette dernière couleur.

Il résulte de là, qu'un prisme de sel gemme, doit donner le spectre calorifique normal. Les autres substances se comportent, par rapport aux rayons calorifiques, comme des prismes en verre coloré par rapport aux rayons lumineux, certaines couleurs étant plus absorbées que les autres, le maximum lumineux changerait de place. Dans la *fig.* 562, les ordonnées des courbes représentent les intensités calorifiques aux différents points du spectre formé par un prisme de sel gemme *s*, de flint *f*, et de crown *c*. Avec le sel gemme, le maximum est à une distance du rouge égale à celle qui sépare le rouge du jaune.



Fig. 562.

Un fait important a été constaté par Melloni, c'est que le maximum calorifique du spectre solaire formé par le sel gemme n'est pas toujours à la même place, l'air étant en apparence également pur, et le soleil à la même hauteur au-dessus de l'horizon. Ce phénomène semble indiquer une absorption de certains rayons calorifiques par l'atmosphère.

La chaleur obscure donne aussi, avec un prisme de sel gemme, un spectre calorifique, dans lequel on peut reconnaître les qualités différentes des rayons inégalement déviés, en voyant qu'ils sont absorbés en proportion différente par

[1] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. XLVIII, p. 385.

une même lame diathermane. Comme le sel gemme absorbe un peu des rayons de chaleur, quand ils sont très faibles (728), il est probable que le spectre calorifique n'est pas complet, et qu'il y manque les rayons les moins réfrangibles.

II. Thermochrôse des corps.

741. Diffusion de la chaleur. — Nous avons considéré jusqu'ici les rayons de chaleur de diverse espèce, et nous les avons comparés aux rayons lumineux différemment colorés. Mais nous savons aussi que les corps non polis, éclairés par une même lumière, présentent des couleurs différentes, c'est-à-dire réfléchissent de la lumière *diffuse* (723), affectant différentes teintes. Nous allons voir que la chaleur d'une même source réfléchie par la plupart des surfaces dépolies présente aussi des qualités différentes, c'est-à-dire que ces surfaces sont *thermochroïques* de diverses manières. Voici comment Melloni, auquel est encore due cette découverte, a pu constater l'existence de la chaleur diffuse, et la distinguer de celle qui est émise, ou est réfléchie spéculairement par la surface des corps [1].

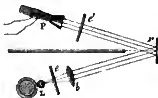


Fig. 563.

Un disque de bois *r* (*fig.* 563) est recouvert de noir de fumée sur l'une de ses faces, et d'une matière blanche, sur l'autre; il est fixé verticalement sur un plateau tournant horizontal. Une lampe est placée en L, et la pile thermoscopique, en P; un large écran les sépare. Les rayons de la source sont rassemblés et rendus sensiblement parallèles, au moyen d'une lentille en verre *b*, qui a aussi pour effet d'épurer le flux calorifique en arrêtant certains rayons. Un écran diathermane *e* sert à faire varier la nature du flux qui tombe sur le disque *r*. Cela posé, si l'on tourne la face blanchie de ce disque du côté de la pile, on voit aussitôt l'aiguille du réomètre marcher de 35° à 30°.

Caractères de la chaleur diffuse. — Ce résultat est dû à la réflexion diffuse; car 1° l'aiguille se met en mouvement aussitôt qu'on démasque la lampe, ce qui exclut l'idée de rayons émis par le disque après qu'il se serait échauffé; de plus, en présentant à la source la face noircie du disque, il n'y a plus qu'un effet très faible, et cependant la surface noircie échauffe beaucoup plus rapidement que la surface blanche; 2° l'aiguille rétrograde immédiatement quand on intercepte les rayons de la lampe, et elle met le même temps à revenir

[1] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. LXXV, p. 337.

au zéro, quelle que soit la face du disque tournée vers la pile ; 3° une lame de verre placée en e', et qui intercepterait tous les rayons émis par une surface de basse température, comme celle du disque r (733), n'affaiblit que peu l'effet produit sur la pile, parce que la lentille b a déjà intercepté les rayons que le verre est capable d'absorber ; 4° on ne peut attribuer le résultat observé à la réflexion spéculaire, car la surface n'est pas polie et la pile peut être placée de manière que la direction Pr fasse avec la surface du disque un angle très différent de celui que forme la direction Lr avec la même surface.

Du reste, la réflexion diffuse se fait également, dans tous les sens autour d'un même point, car si l'on déplace la pile de manière que son axe décrive un cône droit autour de ce point, l'aiguille du réomètre ne change pas de position.

Melloni a aussi opéré avec les rayons solaires, qu'il faisait entrer par une ouverture de 0^{m},1 de diamètre pratiquée dans le volet d'une chambre obscure, et qu'il recevait sur le mur opposé. La pile placée en face de la partie éclairée donnait toujours la même déviation, quand son axe formait un même angle, dans un plan quelconque, avec la surface du mur.

Le noir de fumée renvoie aussi un peu de chaleur diffuse, car l'aiguille du réomètre marche de 1° environ quand on tourne, du côté de la pile, la face noircie du disque r. Cet effet n'est pas dû au rayonnement du disque qui se serait d'abord échauffé, car il commence immédiatement, et une lame de verre placée en e' ne fait que diminuer un peu la déviation, et d'une quantité qui ne dépend pas de son épaisseur ; tandis qu'elle intercepterait toute la chaleur émise par la surface noircie.

742. Influence de la source sur la diffusion. — Des rayons lumineux de différente couleur sont réfléchis en proportion différente par une même surface mate colorée. La chaleur présente des phénomènes analogues ; voici par quel moyen Melloni l'a prouvé : on prend deux disques de carton mince, l'un couvert de noir de fumée des deux côtés, et l'autre noirci d'un côté et garni sur l'autre de blanc de céruse. La pile est placée sur la règle horizontale ll (*fig.* 557), qui peut tourner autour d'un axe vertical passant par le centre du disque. Quand ce disque est soumis à l'action directe de la source, il atteint bientôt une température constante et rayonne par ses deux faces. On place alors la pile du même côté du disque que la source, elle reçoit la chaleur diffuse augmentée de la chaleur émise provenant d'une partie de celle qui a été absorbée ; l'autre est rayonnée par la face postérieure. Puis, en faisant tourner la règle, on amène la pile du côté de l'autre face, dans une position symétrique par rapport au plan fixe du disque, et l'on note l'effet moindre produit par la chaleur que rayonne la face postérieure. Plus la différence entre les effets produits par les deux faces sera grande, plus la diffusion sera prononcée. Voici quelques-uns des résultats trouvés par ce moyen ; les nombres indiquent combien de rayons sont reçus par la pile, en représentant par 100 ceux qu'elle reçoit de la face postérieure du disque dont les deux faces sont noircies.

SURFACE tournée du côté de la pile.		MÉTAL à 400°.	PLATINE incandescent.	LAMPE de Locatelli.	LAMPE à cheminée de verre.
1er disque.	Face postérieure *noire.*	100	100	100	100
	Face antérieure *noire*..	118	117	119	118
2e disque.	Face postérieure *noire.*	93	84	69	46
	Face antér. *blanche*...	129	152	184	250

Si l'on prend les rapports entre les radiations des deux faces du second disque, on trouve les nombres 1,4; 1,8; 2; 5,4 qui vont en augmentant avec la température de la source, c'est-à-dire avec le degré de réfrangibilité des rayons et avec leur thermochrôse (738). L'analogie est donc encore frappante avec les phénomènes lumineux.

Si, au contraire, on prend ce rapport entre les radiations des deux faces du disque noirci des deux côtés, on le trouve sensiblement constant, quelle que soit la source; d'où l'on doit conclure que *le noir de fumée diffuse toujours la même proportion de la chaleur incidente, quelle que soit son origine.*

Il est à remarquer que la face postérieure du disque noirci des deux côtés envoie moins de rayons que la face antérieure. Ce résultat ne doit pas être entièrement attribué au pouvoir diffusif très faible du noir de fumée (741), mais il est dû, en grande partie, à ce que la surface antérieure s'échauffe et rayonne plus que la surface postérieure, à cause de la difficulté qu'éprouve la chaleur à traverser le disque; car la différence augmente avec son épaisseur. Le noir de fumée ne peut donc réfléchir que des quantités extrêmement faibles de chaleur diffuse, de même qu'il ne réfléchit que très peu de lumière diffuse, il se comporte donc pour la chaleur comme pour la lumière, et il est à la fois *mélanothermique* pour les rayons de la première, et *noir* pour ceux de la seconde, qu'il éteint également presque totalement, quelle que soit leur couleur. Les substances blanches, au contraire, sont *thermochroïques*, ainsi que beaucoup d'autres substances que l'on peut appliquer sur le disque de l'appareil. Certains métaux polis ou non, *platine*, *fer*, *plomb*, *étain*, *zinc*, nous offrent des corps *leucothermiques*, c'est-à-dire qui réfléchissent également toute espèce de rayons, comme les corps *blancs* réfléchissent également tous les rayons lumineux colorés. M. Knoblauch a reconnu qu'il y a des métaux thermochroïques, l'or, l'argent, le mercure, et le cuivre et le laiton à un faible degré. Le pouvoir diffusif des métaux varie avec leur nature. Il est plus grand que celui des corps non métalliques, pour l'or, l'argent, l'étain, le platine, le cuivre. Le plomb et le fer ont, dans certains cas, un pouvoir diffusif moindre que celui

des substances blanches ; de même que certains corps blancs éclairés peuvent présenter des différences d'éclat, et même avoir moins d'éclat que certains corps colorés.

743. Nature des rayons diffus. — Pour compléter leur assimilation avec la lumière diffuse, il reste à montrer que les rayons de chaleur diffuse provenant d'une surface *thermochroïque* sont d'espèce différente, quand on change cette surface tout en conservant la même source. C'est ce qu'a fait M. Knoblauch [1] ; ainsi, il a reconnu que la chaleur diffuse émanant d'une surface recouverte de carmin, passe en plus grande proportion à travers une lame de spath d'Islande, que celle qui émane de la surface d'un papier noir. Des résultats semblables ont été obtenus au moyen de lames d'alun, gypse, verre rouge, verre bleu. Quand on change de source, les différences des effets produits avec le carmin et le papier noir se modifient ; elles vont en diminuant quand on remplace la lampe d'Argant successivement par le platine incandescent et la flamme de l'alcool ; avec un fer chaud obscur, il n'y a pas de différence.

Il est facile de reconnaître que le changement de composition du flux calorifique après la diffusion, vient de l'absorption élective exercée sur certaines espèces de rayons ; car les corps qui réfléchissent par diffusion des rayons traversant facilement une substance, réfléchissent peu de ces rayons quand ils sont de l'espèce que cette substance absorbe. De plus, quand la chaleur diffuse ne diffère pas de la chaleur directe de la source, ce qui suppose que la plaque dépolie est *leucothermique*, la nature de la source n'a plus d'influence sur les résultats.

Parmi les résultats constatés par M. Knoblauch, nous citerons les suivants : le velours blanc envoie beaucoup moins de chaleur diffuse que le velours noir, pour toutes les sources ; la tôle est *leucothermique*, car la chaleur qu'elle réfléchit ne se distingue pas de la chaleur incidente, et elle réfléchit avec la même intensité la chaleur de toutes les sources. Le papier blanc et la laque noire ; la toile, la soie, blanches ou noires ; l'or, l'argent et le mercure, ont les mêmes *thermochrôses* ; car les flux réfléchis par ces substances traversent en même proportion différentes plaques diathermanes. Les cristaux sont également *leucothermiques*. La suie et le charbon animal sont *mélanothermiques*.

744. Diffusion par réfraction. — La chaleur qui traverse une substance diathermane dépolie sort dans toutes les directions et d'une manière diffuse, comme la lumière qui a traversé une lame de verre dépoli. Pour le prouver, Melloni [2] dispose, entre la pile et la source de chaleur, deux écrans percés d'une petite ouverture circulaire, et il place entre les deux écrans une lame diathermane polie, du verre par exemple, dont la présence diminue l'effet de la radiation directe. La position de la lame entre les deux écrans n'a aucune

[1] *Annales de Poggendorff*, 1857 ; et *Bibl. de Genève* (arch. des sc., 1858), t. II, p. 22.
[2] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. LXXV, p. 374.

influence sur la déviation stable observée; mais si la lame est dépolie, cette déviation, qui est moindre que lorsqu'elle est polie, augmente quand la lame se rapproche de la pile, parce que les rayons, qui sortent dans toutes les directions par chaque point, forment un cône passant par l'ouverture de l'écran et rencontrant la base de la pile sur une plus grande étendue. L'effet produit ne peut pas être attribué au rayonnement de la plaque dépolie; car, si on la place contre l'écran percé, d'un côté ou de l'autre, la déviation reste la même. On peut encore mettre une lame de verre devant la pile; l'effet n'est que peu diminué, tandis que cette lame intercepterait totalement la chaleur rayonnante de la plaque dépolie, dont la température est très faible. Cette dernière expérience montre aussi que les rayons diffus par réfraction s'épurent à travers le verre dépoli, comme à travers le verre poli. — La chaleur n'éprouve pas la diffusion en traversant une couche de noir de fumée déposée sur une plaque de sel gemme. Il y a encore là analogie avec ce qui se passe dans la lumière; car, en regardant à travers une lame de verre recouverte de noir de fumée, on distingue la forme des objets très éclatants, du soleil par exemple, tandis qu'on ne distingue qu'une lueur diffuse quand on regarde à travers une lame de verre dépoli.

III. Identité d'origine de la chaleur rayonnante et de la lumière

745. La chaleur est due à la même cause que la lumière. — Nous venons de voir comment la similitude entre les propriétés des rayons de chaleur et des rayons de lumière se soutient dans tous les détails des expériences. L'analogie se retrouve encore dans d'autres phénomènes que nous étudierons dans l'optique : nous verrons quo les rayons de chaleur éprouvent, comme les rayons lumineux, la *double réfraction*, c'est-à-dire qu'ils se bifurquent en pénétrant dans certains cristaux. Nous montrerons encore qu'ils sont *polarisés* dans les mêmes circonstances et en suivant les mêmes lois que la lumière, c'est-à-dire qu'ils peuvent être modifiés de manière à présenter des propriétés différentes sur leurs différents côtés; si, par exemple, nous supposons un rayon dirigé verticalement, ces propriétés ne seront pas les mêmes du côté qui regarde le nord, et du côté qui regarde l'est ou l'ouest.

Nous avons expliqué comment un ébranlement produit dans un milieu élastique, comme l'air ou l'éther, donne naissance à deux espéces de vibrations, les unes *transversales* à la direction de la propagation, les autres *longitudinales* (I, 662). Ce sont ces dernières qui produisent le son; les vibrations transversales ne jouant aucun rôle dans ce phénoméne. Or, il résulte des lois de la *polarisation* que, dans le système des ondulations, les mouvements vibratoires de l'éther qui produisent la lumière, s'accomplissent *perpendiculairement* à la direction des rayons; ce sont donc, ici, les vibrations transversales qui sont efficaces. Quant aux vibrations longitudinales, Cauchy, dans une lettre adressée

à Ampère, penchait à leur attribuer les effets de la chaleur. Cette idée, d'abord accueillie avec faveur, ne peut plus être soutenue, maintenant qu'il est bien prouvé que les rayons de chaleur se *polarisent*, ce qui exige que les vibrations qui leur donnent naissance soient transversales. Nous allons voir en outre, que les effets calorifiques, produits aux mêmes points du spectre, doivent être attribués aux mêmes rayons, c'est-à-dire aux mêmes mouvements vibratoires, qui produisent ainsi les deux effets en même temps. Melloni avait d'abord repoussé cette opinion, qu'il a fini plus tard par adopter.

Pour rendre cette identité des rayons lumineux et calorifiques évidente, on a prouvé que la lumière et la chaleur sont absorbées par des lames de différentes substances, dans les mêmes points du spectre et en mêmes proportions. Ce résultat a été établi de la manière suivante par MM. Masson et Jamin [1]. Ayant isolé un pinceau de rayons simples, successivement dans toutes les parties d'un spectre lumineux bien pur, ils ont reconnu que des lames incolores de sel gemme, cristal de roche, alun, verre et eau, qui n'affaiblissent pas sensiblement la lumière, laissent passer également et totalement tous les rayons calorifiques. L'épaisseur du cristal de roche a varié de 1 millimètre à 150 millimètres. Avec une couche d'eau de 80 centimètres, il n'y avait plus que 75 pour cent de chaleur transmise; mais la lumière était aussi sensiblement affaiblie. Les verres colorés qui arrêtent certains rayons lumineux arrêtent aussi les rayons calorifiques de même réfrangibilité; par exemple, la chaleur manque totalement dans les bandes obscures que produit dans le spectre lumineux, l'interposition du verre bleu de cobalt. Des expériences faites en comparant les intensités des rayons directs de chaleur et de lumière aux intensités des rayons qui avaient traversé une lame colorée, ont montré que les pertes de chaleur et de lumière se font toujours dans les mêmes proportions. La chaleur se mesurait au moyen du thermo-multiplicateur, et la lumière, au moyen d'un appareil photométrique. On voit donc que, partout où les rayons produisent à la fois des effets lumineux et calorifiques, ces deux effets sont atténués de la même manière par les milieux interposés, et sont conservés dans les mêmes proportions.

Nous expliquerons en optique, comment on peut mesurer les *longueurs d'ondulation* de la lumière, correspondantes aux différentes couleurs, et nous verrons que les plus courtes correspondent aux rayons les plus réfrangibles. MM. Masson et Jamin ont trouvé les mêmes longueurs d'ondulation pour les rayons lumineux et calorifiques de même réfrangibilité. Il résulte enfin de leurs expériences que toutes les modifications que l'on peut apporter aux vibrations lumineuses, quand on fait passer les rayons à travers certaines substances, se retrouvent pour les rayons de chaleur pris dans les mêmes points du spectre, avec les mêmes intensités et les mêmes valeurs numériques.

On peut conclure de là que la chaleur et la lumière existant simultanément en un même point d'un spectre pur, sont dues aux mêmes rayons, qui ont la

[1] *Comptes-rendus de l'Académie des sciences de Paris*, t. XXXI, p. 14.

propriété de produire les deux sortes d'effets, ou, dans le système des ondulations, aux mêmes mouvements vibratoires de l'éther.

Ces mêmes rayons peuvent aussi produire deux autres genres d'effets; des *effets chimiques*, par exemple les décompositions qui ont lieu sur les substances dites *impressionnables* employées dans la *photographie*; et des *effets phosphorogéniques*, qui consistent dans la propriété de répandre de la lumière pendant un certain temps, communiquée à certaines substances par la rencontre des rayons de lumière ou de chaleur obscure. Nous verrons, dans l'optique, que ce sont encore les mêmes rayons qui produisent ces deux nouveaux genres d'effets aux mêmes points du spectre. Nous ajouterons que, de même qu'il y a des rayons de chaleur obscure au-delà du rouge du spectre, de même il y a des rayons invisibles, produisant des effets chimiques et phosphorogéniques, à l'extrémité opposée du spectre au-delà du violet. Il y a donc des rayons qui ne sont susceptibles de produire que certains des quatre effets; et l'on voit pourquoi, quand on veut comparer les absorptions exercées sur la lumière et sur la chaleur, il est essentiel d'opérer sur les rayons isolés dans le spectre; un faisceau qui vient directement de la source, contenant un mélange de chaleur lumineuse et de chaleur obscure, dont la seconde peut être absorbée, sans diminution correspondante dans l'intensité lumineuse du faisceau.

Il nous reste à rendre compte, dans la théorie des ondulations, des différences d'impression que produit la chaleur et la lumière, la première agissant sur toute la surface du corps, tandis que l'autre n'affecte que l'organe de la vue.

746. Des impressions de chaleur et de lumière [1]. — Il est naturel d'admettre que les vibrations les plus rapides de l'éther sont aussi celles dont l'amplitude est généralement la plus petite. C'est, en effet, ce qui résulte de l'inspection du spectre, qui présente l'éclat le plus faible dans le bleu et le violet, qui correspondent aux vibrations les plus rapides. Il en est de même pour les sons; on remarque que les plus aigus sont généralement les moins intenses; aussi, n'entend-on bien que les basses d'un orchestre dont on est éloigné. Cependant, les sons très graves ont peu d'intensité, quoique l'amplitude puisse être grande; et il en est de même des vibrations de l'éther; car on remarque que l'extrémité du rouge du spectre est très peu brillante.

Les vibrations imprimées à l'air par les corps sonores peuvent produire sur nous deux sortes d'actions: les unes se font sentir sur un organe spécial, l'organe de l'ouïe, quand les vibrations possèdent une rapidité suffisante; les autres affectent toute la surface du corps, en produisant cette sorte de frémissement général qui résulte de vibrations énergiques, qu'elles soient accompagnées ou non d'un son perceptible. Il n'y a que les sons graves qui correspondent à des vibrations d'amplitude assez grande pour produire cet effet général; les sons aigus ne peuvent agir que sur l'oreille, à moins qu'ils ne soient extrêmement intenses.

[1] *Mémoires de l'Académie des sciences de Toulouse* (1859), t. III, p. 493; et t. IV, p. 243.

Nous pouvons considérer, de même, les vibrations communiquées à l'éther par les corps lumineux, comme donnant naissance à deux sortes d'impressions ; les unes particulières à l'organe de la vue. les autres affectant toute la surface du corps : les premières constituent l'impression de *lumière*; les autres, celle de *chaleur*, quand l'amplitude est suffisamment grande. Or, les rayons colorés qui appartiennent à l'extrémité violette du spectre sont engendrés par des vibrations rapides et, par conséquent, d'amplitude très petite ; ces vibrations ne peuvent donc produire l'effet général, l'effet calorifique ; à moins que l'énergie vibratoire ne soit extrême, comme cela a lieu pour la lumière électrique, dont le spectre a donné à MM. de la Provostaye et Desains des signes de chaleur dans la partie violette. L'effet calorifique sera facilement produit par les vibrations plus lentes, qui correspondent aux rayons jaunes, orangés et rouges, et aussi par les vibrations plus lentes encore, trop peu rapprochées pour engendrer l'impression de lumière. Les vibrations de l'air nous offrent des résultats analogues ; quand il y en a moins de 32 par seconde, elles peuvent bien agir sur toute la surface du corps, mais elles sont sans action sur la membrane du tympan.

Ampère trouvait à l'absence d'effet lumineux dans les rayons les moins réfrangibles, une tout autre cause. Comme ces rayons sont le plus facilement absorbés par les milieux diathermanes, il attribuait à leur absorption dans les humeurs de l'œil l'absence d'effet de ces rayons sur l'organe de la vue. Cette absorption a certainement une influence sur la limite du spectre *lumineux*, du côté des rayons les moins réfrangibles ; mais la rapidité des vibrations doit, à elle seule, déterminer une limite, car du côté des rayons les plus réfrangibles, où la chaleur est à peine absorbée (740), les effets lumineux finissent par disparaître après s'être affaiblis graduellement, et cependant, il existe encore des rayons invisibles au-delà du violet, comme l'attestent les actions chimiques et phosphorogéniques (745). Nous avons vu que les vibrations trop rapides de l'air sont, de même, impuissantes à produire le son (I, 539).

On voit, par ce qui précède, comment on peut rattacher les impressions de chaleur et de lumière à une seule et même cause. Tantôt les ondulations de l'éther produisent les deux effets en même temps, quand l'amplitude et la rapidité des vibrations sont comprises entre certaines limites ; tantôt l'un de ces effets seulement, quand les vibrations sont trop lentes, ou leur amplitude trop petite.

La manière dont apparaissent et se succèdent les diverses espèces de rayons lumineux quand on échauffe un corps jusqu'à l'incandescence, vient encore à l'appui de la théorie qui précède.

747. Corps lumineux par incandescence. — Quand on élève la température d'un corps, la source qui l'échauffe communique des vibrations à l'éther qu'il contient, et, par suite, à ses molécules. Celles-ci, à leur tour, agissent sur l'éther et y excitent des ondulations de différentes longueurs. Les plus longues ont la plus grande amplitude et sont d'abord seules capables de produire

l'impression de chaleur; elles correspondent aux rayons les moins réfrangibles; car nous avons vu qu'un prisme de sel gemme dévie d'autant moins les rayons, que leur température est plus basse. Si la chaleur communiquée devient plus intense, l'amplitude de toutes les vibrations augmentant, les plus rapides finissent par pouvoir agir sur la rétine, et le corps échauffé devient lumineux.

D'après ce que nous avons dit, ce sont les rayons rouges, dont les vibrations sont les plus lentes, et par conséquent de plus grande amplitude, qui devront apparaître les premiers ; c'est, en effet, ce que M. Draper a trouvé par l'expérience, et sans idée préconçue. Il a d'abord formé un spectre au moyen d'une fente éclairée, et il a relevé, en se servant d'une petite lunette micrométrique, les positions des différentes couleurs. Il a ensuite remplacé la fente lumineuse par un fil de platine dont il faisait varier le degré d'incandescence au moyen d'un *courant électrique* plus ou moins intense ; il vit d'abord apparaître la partie rouge du spectre ; puis, à mesure que l'éclat du fil augmentait, les couleurs suivantes, jusqu'au violet. Remarquons encore qu'un corps qui devient incandescent paraît d'abord d'un rouge dont l'éclat augmente, jusqu'à ce qu'il devienne d'un blanc éblouissant ; ce qui indique que les vibrations plus rapides, qui correspondent aux couleurs autres que le rouge, viennent joindre plus tard leur action à celles qui correspondent aux rayons rouges, pour constituer le mélange qui donne la lumière blanche.

Nous aurons à revenir de temps à autre sur ces considérations, toutes les fois que nous étudierons de nouvelles propriétés, ou de nouveaux effets de la chaleur.

§ 4. — DU PASSAGE DE LA CHALEUR PAR LA SURFACE DES CORPS.

748. Le refroidissement et l'échauffement des corps dépendent : 1° de la différence de leur température avec celle du milieu ambiant ; 2° de la facilité plus ou moins grande avec laquelle la chaleur se déplace dans leur intérieur ; 3° enfin, de la facilité avec laquelle la chaleur peut passer par leur surface pour sortir ou pour entrer. Nous allons d'abord nous occuper des phénomènes que l'on observe dans ce passage, quand on rend les autres circonstances identiques, ou qu'on annule leur influence.

Loi de Newton ou de Richmann. — Dans les expériences que l'on fait à ce sujet, on s'appuie sur une loi que nous allons d'abord énoncer, et sur laquelle nous reviendrons plus loin (781) : *la vitesse du refroidissement ou de l'échauffement d'un corps est proportionnelle à la différence de sa température avec celle du milieu ambiant.* On nomme *vitesse*, la variation de température pendant l'unité de temps, choisie assez courte pour que la perte ou le gain de chaleur puissent être regardés comme uniformes pendant sa durée. Cette loi, purement empirique, énoncée par Newton dans ses opuscules, n'est

qu'approchée ; on ne peut la regarder comme suffisamment exacte que pour des différences de température qui ne dépassent pas 20°, la plus élevée des deux ne dépassant pas elle-même 40°. Elle est connue sous le nom de *loi de Newton*, ou de *loi de Richmann*, parce que ce dernier physicien en a constaté l'exactitude approchée, par un grand nombre d'expériences.

I. Pouvoir émissif.

749. Définition du pouvoir émissif. — Quand un corps se refroidit, on reconnait que le temps que met sa température à s'abaisser d'un même nombre de degrés dépend de la nature de sa surface. Pour le prouver, Rumfort prit deux vases cylindriques identiques, suspendus par des fils ou reposant sur trois pointes en bois, de manière que la chaleur ne pût se perdre par le support (*fig.* 564); la surface latérale de l'un d'eux était nue, et celle de l'autre recouverte d'une fine toile. Ces vases furent remplis d'eau bouillante, dont un thermomètre *t* indiquait la température. Ayant observé le temps que mettait chaque thermomètre, à baisser de 1°, Rumfort trouva que le vase nu se refroidissait beaucoup plus lentement que l'autre. Ayant recouvert ce dernier avec différentes substances, il reconnut aussi que la vitesse du refroidissement dépendait de ces substances. Quand la surface était noircie par la fumée d'une lampe, le refroidissement était le plus rapide. La nature de la couche superficielle du corps a donc une grande influence sur la sortie de la chaleur. On nomme *pouvoir émissif* ou *pouvoir rayonnant* d'une substance, la faculté plus ou moins grande qu'elle possède de laisser échapper la chaleur par sa surface.



Fig. 564.

750. Expériences de Leslie. — Quelques semaines avant la publication des expériences de Rumfort dans les transactions philosophiques, en 1804, Leslie avait fait connaître, dans ses *recherches sur la nature de la chaleur*, des expériences sur le même sujet, faites par une méthode préférable à celle de Rumfort, car, dans les expériences de ce dernier, le refroidissement n'est pas dû seulement au rayonnement, mais encore au contact de l'air.

L'influence de l'air est évidente dans les expériences suivantes : Leslie ayant rempli d'eau bouillante deux vases d'étain aplatis, l'un nu, et l'autre revêtus de noir de fumée, il trouva qu'il fallut pour que leur température baissât de la moitié de son excès sur la température de l'air :

	Vase nu.	Vase noirci.
Par un vent modéré.	44 min.	35 min.
Par une brise assez forte.	23	20,25
Par un vent violent	9,5	9

On voit que l'action du vent tend à ramener les temps à l'égalité.

Appareil de Leslie. — L'appareil dont s'est servi Leslie, pour n'avoir pas à tenir compte de l'action refroidissante de l'air, consiste en un vase cubique S (*fig.* 565), rempli d'eau bouillante, et dont les faces latérales sont revêtues des différentes substances dont on veut comparer les *pouvoirs émissifs*. Ce cube est placé en face d'un miroir sphérique *m*, destiné à concentrer un grand nombre de rayons sur l'une des boules, *f*, d'un thermomètre différentiel, placée au foyer conjugué du miroir. L'autre boule est abritée par un écran *e*. Ce système constitue l'*appareil de Leslie*.

Il faut prouver que les excès indiqués par le thermomètre différentiel, quand il est devenu stationnaire, sont proportionnels aux intensités de la chaleur rayonnée par le corps. Or, le miroir reçoit, à chaque instant, une fraction *nq* de la chaleur *q* émise par le corps, fraction qui dépend de l'ouverture du miroir et de la distance S*m*. Le miroir réfléchit une fraction *m* de la chaleur qu'il reçoit, c'est-à-dire la quantité *m* . *nq*, quantité qui tombe sur la boule du thermomètre. Celle-ci réfléchit une partie de la chaleur qu'elle reçoit, et en absorbe une fraction *p*, c'est-à-dire la quantité *p* . *mnq*, dans laquelle les nombres *p*, *m*, *n* sont constants pour un même appareil. La température de la boule focale s'élèvera donc; mais comme elle rayonne elle-même et se refroidit avec une vitesse proportionnelle, d'après la loi de Newton (748), à l'excès qu'elle indique par rapport à l'autre boule qui se trouve à la température du milieu ambiant, ce qu'elle perd va en augmentant et finit par égaler ce qu'elle reçoit. Alors la température est stationnaire, et l'excès indiqué est proportionnel à la quantité de chaleur perdue (748). Comme cette quantité est égale à la quantité *pmnq* reçue par la boule pendant le même temps, on voit que l'excès de température de cette boule est proportionnel à *pmnq*, ou à la quantité *q* émise par la surface S, puisque *n*, *m* et *q* restent constants pour un même appareil et pour une même distance S*m*. Si donc on recouvre cette surface S avec différentes substances, on pourra comparer leurs pouvoirs émissifs, en comparant les excès donnés par le thermomètre différentiel.

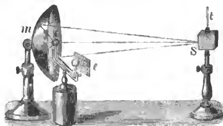


Fig. 565.

Delaroche a confirmé ce raisonnement par l'expérience : ayant pris deux miroirs conjugués, et ayant noirci à moitié, aux trois quarts..... celui dont le foyer recevait la boule du thermomètre, il reconnut que les différences de température des deux boules étaient la moitié, le quart..... de la différence qu'on observait lorsque ce miroir était entièrement brillant. Or, comme nous le verrons, les parties noircies ne réfléchissent pas sensiblement de chaleur.

Résultats de l'expérience. — Leslie a fait beaucoup d'expériences au moyen de son appareil; chaque série d'expériences fut répétée en remplissant le cube, d'eau à différentes températures, et plaçant les substances dont il voulait comparer les pouvoirs, tantôt sur une face du cube, tantôt sur une autre. Il constata ainsi que les effets produits ne dépendent que de la couche superficielle du corps rayonnant; car la nature des faces du cube sur lesquelles on applique les différentes substances, est sans influence sur les résultats.

Voici le tableau des principaux résultats obtenus par Leslie. On a représenté par 100 le pouvoir rayonnant du noir de fumée, qui est le plus grand de tous, et auquel on compare les pouvoirs des autres substances :

Noir de fumée	100	Minium	80
Eau (par évaluation)	100	Plombagine	75
Papier à écrire	98	Plomb terne	45
Cire à cacheter	95	Plomb brillant	19
Verre (crown-glass)	90	Mercure	20
Encre de Chine	88	Fer poli	15
Glace	85	Etain, argent, cuivre, or	12

Rumfort a comparé les pouvoirs émissifs des corps par une méthode semblable à une de celles qu'on emploie pour comparer les intensités de deux lumières, et en s'appuyant sur ce principe, que l'intensité de la chaleur reçue varie en raison inverse du carré des distances. Il plaçait, en face des deux boules de son thermoscope (708), les bases de deux vases cylindriques égaux remplis d'eau bouillante; ces bases sont recouvertes des substances à comparer, et un écran placé entre les boules empêche chacune d'elles de recevoir la chaleur qui ne lui est pas destinée. En éloignant le vase dont la base présente le plus grand pouvoir émissif, on fait en sorte que l'index du thermoscope soit au zéro. Alors les pouvoirs émissifs sont en *raison directe* du carré des distances d, d' des vases aux deux boules. En effet, soit i, i' les intensités des rayons émis par les deux surfaces égales, c'est-à-dire les quantités de chaleur envoyées à l'unité de distance sur l'unité de surface; aux distances d et d', ces intensités seront $i : d^2$ et $i' : d'^2$; et comme le thermoscope est au zéro, ces quantités sont égales; on a donc $i : i' = d^2 : d'^2$.

Remarque. — Quand ces expériences ont été faites on n'avait pas encore découvert qu'il y a des rayons de différentes thermochrôses. Le raisonnement par lequel on prouve que les pouvoirs émissifs sont proportionnels aux indications du thermoscope supposent que m et p sont constants, quelle que soit la substance rayonnante. Or, nous savons que diverses substances à la même température peuvent émettre des mélanges composés différemment (734), et nous verrons que les rayons de différente thermochrôse ne sont pas réfléchis en même proportion, tant sur la substance du miroir que sur la boule du thermomètre. L'inclinaison des rayons sur la surface du miroir, et par conséquent

son ouverture a aussi une influence, ce qui montre qu'il faudra toujours placer la source à la même distance. Cependant, Leslie ayant employé des températures assez faibles et toujours de la chaleur obscure, on peut regarder les résultats qu'il a donnés comme suffisamment approchés pour les applications qu'on en fait, sauf ceux qui correspondent à certains métaux, lesquels sont beaucoup trop forts, comme nous allons le voir.

751. Expériences avec le thermo-multiplicateur. — Cet instrument donne des résultats plus exacts que l'appareil de Leslie; les rayons tombent directement et normalement sur la base de la pile, qui, étant garnie de noir de fumée, les absorbe toujours en même proportion, quelle que soit leur nature, comme nous le verrons. Melloni a trouvé, avec cet appareil, les nombres qui suivent:

Noir de fumée	100	Encre de Chine	85
Blanc de céruse	100	Gomme laque	72
Colle de Poisson	91		

Le noir de fumée, le blanc de céruse, le papier, le verre, possèdent à peu près le même pouvoir émissif. La couleur, la dureté, la transparence ne paraissent donc pas avoir d'influence sur cette propriété. Les métaux ternis rayonnent plus que les mêmes métaux brillants, qui sont les corps doués du plus faible pouvoir émissif.

Pouvoir émissif des métaux. — Le thermo-multiplicateur a servi à MM. de la Provostaye et P. Desains à prouver que le pouvoir émissif des métaux est beaucoup plus faible qu'on ne le croyait[1]. Ayant d'abord observé qu'une surface argentée ne déviait qu'à peine l'aiguille de leur appareil, quand la même surface noircie la déviait de 60°, il leur a fallu tout d'abord s'arranger de manière à obtenir des déviations appréciables avec les surfaces argentées, tout en ne sortant pas des limites des tables de graduation (712), avec les surfaces noircies.

La première méthode employée consiste à faire passer le faisceau de rayons calorifiques, par l'ouverture variable d'un écran, et à constater dans quel rapport se trouve diminuée la déviation du réomètre quand cette ouverture devient n fois plus petite. Si ce rapport est égal à $1 : m$, la surface noire qui produit une déviation d, en rayonnant par l'ouverture rendue n fois plus petite, aurait produit une déviation md, par l'ouverture entière. On peut ainsi réduire la déviation produite par la surface noircie, de manière à la rendre observable, puis calculer ce qu'elle eût été si l'ouverture n'avait pas été rétrécie.

Dans la seconde méthode, on procédait de la manière suivante : soit δ et δ' les déviations produites par une même surface noircie, portée successivement à $t°$ et à $t'°$, dans une enceinte à $\theta°$; l'expérience prouve que l'on a sensiblement

$$\delta : \delta' = a^{t-\theta} - 1 : a^{t'-\theta} - 1,$$

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XXII, p. 372.

en prenant $a = 1,009$; pourvu que les températures soient au-dessous de 160°. On peut donc observer la déviation δ produite par le noir de fumée à une température t peu élevée, et passer de cette déviation, au moyen de la relation qui précède, à celle qui eût été donnée à la température t' que possède la surface métallique. Voici les résultats trouvés par ces deux méthodes, pour les pouvoirs émissifs rapportés à celui du noir de fumée représenté par 100 :

Argent vierge laminé	3,00	Argent argenté	2,05
Argent mat, chimiquement déposé sur le cuivre	5,36	Platine laminé	10,80
Argent pur bruni	2.50	Platine bruni	9,50
Argent déposé chimiquement, bruni	2,25	Or en feuilles	4,28
		Cuivre en lame	4,90

Melloni est arrivé à fort peu près au même résultat, pour l'argent poli, par une méthode toute différente; il comparait les températures stationnaires indiquées par deux thermomètres, l'un noirci, l'autre enveloppé d'une lame d'argent, lorsque ces instruments rayonnaient vers l'espace pendant une nuit sereine.

752. Variation du pouvoir émissif avec la température. — Les expériences que nous avons mentionnées ont été faites à des températures inférieures, ou peu supérieures, à 100°. Il résulte des recherches de MM. de la Provostaye et P. Desains que le pouvoir émissif change dans les températures très élevées [1]; ces nouvelles expériences ont été faites au moyen de deux thermo-multiplicateurs employés simultanément.

Le corps rayonnant était une lame de platine, de 18^{mm} de largeur et de 76^{mm} de longueur, que l'on pouvait porter à des températures de 100° à 600°, en y faisant passer un *courant électrique*, produit par une *pile de Bunsen* d'une trentaine de couples, appareil que nous décrirons plus tard (tome III). La lame de platine étant recouverte de noir de fumée sur ses deux faces, deux piles thermo-électriques identiques étaient placées de chaque côté, de manière à donner les mêmes déviations. On remplaçait ensuite le noir de fumée de l'une des faces de la lame de platine par une couche de borate de plomb, et l'on observait encore *simultanément* les rayonnements des deux faces. Le rapport entre les effets produits donnait celui des pouvoirs émissifs des deux substances. On a reconnu ainsi que le pouvoir du borate de plomb diminue notablement quand on porte sa température au rouge naissant. A 100°, il est sensiblement égal à celui du noir de fumée et de l'oxyde noir de cuivre, et à 550° environ il n'en est que les 0,75; il reprend sa première valeur quand on le ramène à 100°, ce qui prouve que la diminution n'est pas due à une altération de sa surface, produite par la chaleur. Dans les mêmes circonstances, le pouvoir émissif du platine passe de 0,10 à 0,14 de celui du noir de fumée.

[1] *Comptes-rendus de l'Académie des sciences de Paris*, t. XXXVIII, p. 440.

753. De l'influence du poli. — Leslie avait trouvé que le pouvoir émissif d'un métal est d'autant plus grand qu'il est moins poli, et il avait conclu de là que les aspérités qui recouvrent une surface dépolie ont la faculté de laisser échapper facilement la chaleur. Mais Melloni a prouvé qu'une même surface possède le même pouvoir émissif, qu'elle soit polie ou dépolie, et que les différences trouvées par Leslie étaient dues à une cause étrangère à la présence ou à l'absence des aspérités [1]. Pour le démontrer, Melloni appliqua sur les faces d'un vase cubique en métal, deux lames d'ivoire et deux lames de jayet, assujetties dans des coulisses et pressées par des ressorts. L'une des lames de chaque couple était polie, et l'autre, rayée en divers sens. Cependant il n'y eut aucune différence entre les effets produits sur le thermo-multiplicateur, par les deux lames de même espèce. Un vase cubique en marbre, dont les parois latérales avaient la même épaisseur, donna le même résultat par ses quatre faces, dont une était polie, une autre terne, une autre rayée dans un sens, et la dernière rayée dans deux sens perpendiculaires. Les substances dont il s'agit ayant un pouvoir émissif très grand, 93 et 98, de manière qu'il ne peut être augmenté que très peu, Melloni opéra sur des métaux; il construisit un cube dont les faces latérales étaient formées par 4 lames d'argent soudées. Deux de ces lames avaient été martelées fortement; les deux autres, coulées et refroidies lentement, puis polies à la pierre ponce et au charbon. Une des lames écrouies et une des lames coulées furent ensuite rayées dans un sens. Le cube rempli d'eau bouillante ayant été mis en présence de la pile du thermo-multiplicateur, l'aiguille du réomètre donna les déviations suivantes :

Plaque écrouie.	polie.	10°	Plaque fondue.	polie.	13,7
	rayée.	18		rayée.	11,3

On voit qu'en rayant la plaque écrouie on a augmenté son pouvoir émissif, ce qui est d'accord avec les résultats trouvés par Leslie; mais en rayant la plaque coulée, son rayonnement a été diminué. On peut donc, dans certains cas, diminuer le pouvoir émissif en rayant les surfaces.

Melloni conclut de ses expériences que, si Leslie a trouvé un pouvoir émissif plus grand pour les métaux rayés, c'est qu'il employait des lames tirées au laminoir et recouvertes sur les deux faces d'une couche plus écrouie et plus dense que les parties intérieures. En rayant la lame, on met à découvert, au fond des sillons, des parties moins denses, en nombre d'autant plus grand que l'on pratique plus de raies. De plus, la couche superficielle peut se distendre par son élasticité quand on y pratique les sillons, et sa densité diminuer. Le jayet, le marbre, l'ivoire, qui ne sont pas écrouis, donnent les mêmes résultats, qu'ils soient polis ou dépolis. L'argent coulé rayonne moins après qu'on l'a

[1] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. LXX, p. 435.

rayé, parce que les grains de la substance dure avec laquelle on le raye compriment le métal au fond des sillons, ce qui augmente sa densité. M. Knoblauch a confirmé cette explication par diverses expériences. Par exemple, deux lames de cuivre l'une rayée, l'autre polie avaient produit sur le thermo-multiplicateur des déviations de 48° et de 29°, ayant déposé une légère couche de cuivre sur les deux lames, par la galvanoplastie, ce qui mettait les deux surfaces dans les mêmes conditions de densité, elles produisirent des déviations presque égales ; 49°, 25 et 51, 5°.

754. Influence de l'épaisseur de la couche superficielle. — Les métaux appliqués en feuilles extrêmement minces donnent toujours le même rayonnement que des plaques épaisses de même substance ; mais il n'en faudrait pas conclure que l'épaisseur de ces feuilles n'a aucune influence, car le pouvoir rayonnant des métaux est si faible que les différences peuvent échapper à l'observation, et, d'un autre côté, on trouve des substances chez lesquelles l'influence de l'épaisseur de la couche superficielle est évidente. Leslie étendit sur deux faces d'un vase cubique des couches très minces de colle ; l'une reçut une seule couche, et l'autre quatre. Dans les circonstances de l'expérience, la première face fit marcher le thermomètre placé au foyer du miroir, de 21°,11, et l'autre, de 30°. En augmentant le nombre des couches, le rayonnement augmenta encore, jusqu'à ce que l'épaisseur de la couche totale fût de 2 à 4 centièmes de millimètre, suivant les substances appliquées. Un plus grand nombre de couches ne changea plus rien au résultat [1]. Une légère couche d'huile d'olive fit marcher le thermomètre focal de 28°, et en augmentant le nombre de couches l'effet augmenta aussi, jusqu'à 32°,77. La gomme, la résine, que l'on peut dissoudre dans l'alcool, de manière à les appliquer en couches extrêmement minces, donnent des résultats semblables.

Melloni et M. Knoblauch ont confirmé ces faits au moyen du thermo-multiplicateur. En face de l'une des bases de la pile thermo-électrique, était placé un cube plein d'eau chaude, dont une des faces était recouverte successivement de plusieurs couches de vernis. Melloni a reconnu aussi que des feuilles d'or d'épaisseur différente, appliquées sur un cube de verre diminuent toutes le pouvoir émissif, de la même quantité.

755. Hypothèse du rayonnement particulaire. — Il semble résulter de ce qui précède que la chaleur rayonnante part d'une certaine profondeur au-dessous de la surface, comme l'a admis Fourier. Quand l'épaisseur de la couche superficielle est très faible, les rayons partent des molécules du métal sur lequel cette couche est appliquée, en même temps que de celles de l'enduit. Plus l'épaisseur de ce dernier est grande, moins il y a de molécules métalliques

[1] Pour calculer l'épaisseur du vernis, on pèse une lame sur laquelle on applique le même nombre de couches que sur le cube. On obtient ainsi facilement le poids de la couche de vernis, d'où l'on conclut le volume, en divisant le poids par la densité de la substance solide. L'épaisseur est alors la hauteur d'un prisme droit ayant pour base la surface de la lame.

qui envoient des rayons au-dehors; et comme le pouvoir émissif du métal est bien moindre que celui du vernis, on comprend pourquoi l'effet va en augmentant en même temps que l'épaisseur de ce dernier, jusqu'à ce que cette épaisseur soit assez grande pour que les rayons qui partiraient de la plaque métallique soient tous interceptés par les molécules de vernis.

Ces faits s'expliquent en admettant que chaque particule d'un corps solide rayonne dans toutes les directions avec une intensité qui dépend de sa température et peut-être aussi de sa nature. Une partie de ces rayons peut passer au-dehors quand la particule est assez près de la surface pour que les particules qui en sont encore moins éloignées ne les interceptent pas. Plus la particule est placée profondément, moins elle laisse échapper au-dehors de la chaleur qu'elle rayonne dans tous les sens. C'est là l'hypothèse du *rayonnement particulaire* due à Laplace.

Il résulte de là que les substances les plus denses doivent avoir généralement le plus faible pouvoir émissif, ce qui a lieu en effet (750); et que si l'on augmente la densité d'un corps, on doit diminuer son pouvoir émissif. C'est effectivement ce qui résulte des expériences faites sur les métaux écrouis ou non (753), et de celles de MM. de la Provostaye et P. Desains, qui ont constaté que l'argent bruni possède un moindre pouvoir que l'argent déposé chimiquement (751).

Il résulte encore de là, que les substances les plus *athermanes* doivent être *diathermanes* sous des épaisseurs très petites. C'est en effet ce qui a lieu même pour les métaux les plus denses. M. Knoblauch a vu une feuille d'or interposée sur le trajet d'un faisceau de chaleur, ne pas empêcher l'aiguille du thermomultiplicateur de se dévier de 33°, 4°, 1° environ, suivant l'épaisseur du métal. De l'argent ou du platine précipités sur une lame de verre ont donné des résultats analogues. Les rayons ne passent pas à travers des trous ou des fissures du métal, car ils changent de thermochrôse en le traversant; en effet, la chaleur qui a traversé l'or est absorbée en proportion différente de la chaleur directe, par des lames de verre coloré. Quand l'épaisseur de l'or augmente, la proportion de chaleur absorbée par un verre *rouge* ou *jaune* va en augmentant, tandis qu'elle va en diminuant avec les verres *bleus* ou *verts*. On sait que les feuilles d'or laissent aussi passer la lumière, qui prend une teinte verdâtre après les avoir traversées. L'argent donne, avec la chaleur, des résultats semblables à ceux de l'or, mais les rapports numériques sont différents. Le platine paraît *athermochroïque*[1].

756. Théorie de Melloni. — Melloni, en rapprochant tous ces faits, a émis l'opinion que le pouvoir émissif ne dépend nullement de la nature de la substance, mais seulement de la profondeur de la couche superficielle des molécules qui lancent des rayons au dehors; de sorte que, si cette couche avait

[1] *Annales de Poggendorff* (1857), et *Bibl. de Genève* (arch. des sc., 1858), t. II, p. 22.

la même épaisseur chez tous les corps, leur pouvoir émissif serait aussi le même. Cette théorie ingénieuse a reçu une confirmation inattendue des expériences de MM. Masson et Courtépée, qui ont démontré que les substances réduites en poudre fine ont toutes le même pouvoir émissif[1]. Ces substances, obtenues par précipitation chimique, étaient délayées dans de l'eau contenant un peu de colle de peau, et appliquées sur l'une des faces d'un vase cubique plein d'eau bouillante, en face duquel était disposée une pile thermo-électrique. Seize substances, sur vingt, ont rayonné autant de chaleur que le noir de fumée[2]. Les quatre autres (vermillon, sulfure de cadmium, argent, oxyde vert de chrome, minium) ont donné un pouvoir émissif un peu plus faible, mais la première n'est pas un précipité chimique, et les autres ont été calcinées pour leur donner de la cohésion. Quant à l'argent, il a toujours conservé un éclat métallique, ce qui prouve qu'il n'était pas en poudre impalpable.

757. Pouvoir émissif des gaz. — Les gaz rayonnent très faiblement, comme on peut s'en assurer en approchant un thermoscope de la flamme du gaz hydrogène, dont la température est extrêmement élevée; on n'obtient aucun effet, ou bien il est très faible. La flamme du gaz d'éclairage, celle des lampes, rayonnent beaucoup plus, à cause des particules de charbon incandescent qu'elles contiennent et qui leur donnent leur éclat. On peut recueillir ces particules, en les empêchant de se consumer, par l'approche d'un corps froid; elles se déposent sur ce corps sous forme de *noir de fumée*. Si l'on plonge dans la flamme du gaz hydrogène, une spirale de fil de platine, ce métal en prend la température et rayonne vivement.

II. Pouvoir réflecteur.

758. Quand des rayons de chaleur rencontrent un corps, une partie est réfléchie et l'autre passe au-delà de la surface, soit pour être absorbée et échauffer le corps, soit pour le traverser s'il est diathermane. On appelle *pouvoir réflecteur* ou *réflexibilité* d'un corps, la faculté plus ou moins prononcée qu'il possède de renvoyer une partie de la chaleur incidente. Scheele avait reconnu une différence dans le pouvoir réflecteur des différentes substances. Boyle, ayant fait un grand miroir sphérique avec du marbre noir, ne put enflammer du bois à son foyer, résultat qu'il obtenait facilement avec un miroir de métal beaucoup plus petit.

[1] *Comptes-rendus des séances de l'Académie des sciences de Paris*, t. XXV, p. 936.

[2] Voici le nom de ces substances : *noir d'ivoire, oxyde de cobalt, sulfate de plomb, oxychlorure d'antimoine, céruse, sulfate de baryte, platine, chromate de plomb, sulfate de chaux, alumine, silice, bleu de Prusse, carbonate de baryte, carbonate de zinc, phosphate de chaux.*

Leslie a fait beaucoup d'expériences pour comparer les pouvoirs réflecteurs des différentes substances. D'abord, il recouvrait successivement le miroir de son appareil (750) des différentes substances qu'il voulait comparer, et observait l'effet produit, dans les différents cas, sur le thermomètre focal, par une même source de chaleur. Ce moyen est dispendieux et incommode. Leslie en a employé un autre ; les substances à comparer sont appliquées sur un disque *ab* (*fig.* 566), que l'on dispose perpendiculairement à l'axe du miroir *m*, entre ce dernier et le foyer conjugué *f'* du corps rayonnant. D'après les lois de la réflexion, il est facile de voir que les rayons qui se réfléchissent sur la surface *ab* vont se réunir en un point *f* symétrique du point *f'* par rapport à cette surface. On place en *f* l'une des boules d'un thermoscope, et l'excès de sa température sur celle de l'autre boule est proportionnel à la quantité de chaleur reçue par cette boule, et par conséquent à celle que réfléchit la plaque *ab*. Les excès sont donc entre eux comme les pouvoirs réflecteurs, en supposant que la température de la source et les conditions des différentes parties de l'appareil restent les mêmes dans toutes les expériences. En représentant par 100 le pouvoir réflecteur du laiton poli, Leslie a trouvé les résultats suivants :

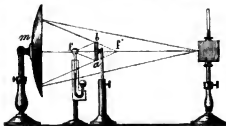


Fig. 566.

Laiton	100	Plomb	60
Argent	90	Etain mouillé de mercure	10
Etain en feuilles	85	Verre	10
Etain plané	80	Verre enduit de cire ou d'huile	5
Acier	70	Noir de fumée	0

On voit que le noir de fumée ne réfléchit pas sensiblement de chaleur, et que les autres corps sont rangés dans un ordre inverse de celui qui correspond aux pouvoirs émissifs.

Ces nombres ne sont pas aussi absolus que le croyait Leslie, car ils peuvent dépendre, pour un même disque, de la nature du flux calorifique envoyé par la source.

759. Influence de l'épaisseur de la couche superficielle. — Leslie, ayant appliqué des couches de vernis sur la surface du miroir sphérique de son appareil, reconnut que la proportion de chaleur réfléchie diminue à mesure que le nombre de couches augmente, jusqu'à ce que l'épaisseur atteigne $0^{mm},25$; alors les résultats sont constants. Par exemple, Leslie

a trouvé que l'effet sur le thermomètre était, avec la colle de poisson, de

127°, 98° 93°, 87°, 61°, 39°, 29°, 21°, 15°;

quand l'épaisseur de la couche était, en millièmes de millimètres,

0, 0,06, 0,25, 0,50, 1,35, 2,7, 5,4, 13,5, 25.

On explique ce résultat en admettant que la réflexion se fait, non seulement sur les molécules superficielles du miroir, mais encore sur celles qui sont au-dessous jusqu'à une certaine profondeur, les rayons obliques traversant les espaces inter-moléculaires pour venir rencontrer les molécules profondes et se réfléchir contre elles. On remarque que la limite d'épaisseur est la même que celle qui a été trouvée, pour le pouvoir émissif (754).

Melloni et Nobili ont appliqué le thermo-multiplicateur à la comparaison des pouvoirs réflecteurs des différentes substances. La plaque réfléchissante était disposée horizontalement en *m* (*fig.* 567), ce qui permettait d'opérer sur des liquides, et les rayons incidents étaient dirigés à travers un tube de carton noirci *t*, et reçus, après la réflexion, sur une des faces de la pile *p*, inclinée convenablement. Nobili et Melloni employaient la chaleur de la main appliquée à l'ouverture *o* du tube *t*. Ils ont constaté que la température de la main est sensiblement constante pendant plusieurs heures, quand on se trouve dans de bonnes conditions de santé. Ils ont trouvé, par cette méthode, que le mercure est le meilleur réflecteur de la chaleur; puis, viennent les autres métaux dans l'ordre assigné par Leslie.



Fig. 567.

760. Proportion de chaleur réfléchie sur les corps diathermanes.— Les méthodes qui précèdent ne donnent pas le rapport entre la quantité de chaleur incidente et celle qui est réfléchie. Melloni résout la question de la manière suivante pour les substances diathermanes [1]. Supposons d'abord qu'il s'agisse du sel gemme qui n'absorbe pas sensiblement de chaleur, les quantités réfléchies sur les deux faces forment un total de 0,077, comme nous l'avons vu plus haut (728). Pour faire la part de chacune d'elles, soit R la proportion réfléchie par la face d'entrée ; 1 — R sera la quantité qui pénétrera et arrivera à la face de sortie, laquelle réfléchira une proportion R de la chaleur reçue, c'est-à-dire R (1 — R). En ajoutant à ces deux quantités réfléchies la quantité transmise 0,923, on devra trouver la quantité totale 1. On aura donc

$$R + R(1 - R) + 0{,}923 = 1, \qquad \text{d'où} \qquad R = 1 \pm \sqrt{0{,}923} = 1 \pm 0{,}9607.$$

[1] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. LX, p. 402.

Le premier signe du radical ne peut convenir, puisque R ne peut être plus grand que 1. En prenant le signe —, on trouve R = 0,0393. Pour obtenir la proportion réfléchie sur la face de sortie, il suffit de retrancher la valeur de R, de la perte totale 0,077 ; ce qui donne 0,0377.

La chaleur qui se réfléchit à la seconde surface revient normalement vers la première, s'y réfléchit partiellement et retourne à la seconde ; là, une partie sort, tandis que l'autre se réfléchit de nouveau, pour venir rencontrer une seconde fois la première face... Il résulte de là que le faisceau transmis est augmenté de rayons qui se sont réfléchis 2, 4, 6... fois ; mais Melloni a démontré que la chaleur qui sort, après avoir éprouvé plusieurs réflexions, est insensible. En effet, si l'on incline un peu une lame épaisse, les rayons réfléchis en dedans sont rejetés latéralement, ne viennent plus à la pile, et cependant l'effet produit sur l'aiguille du réomètre reste le même.

Supposons maintenant que l'on ait affaire à une substance autre que le sel gemme. Melloni fait d'abord remarquer qu'une petite différence dans l'épaisseur d'une lame diathermane ne produit pas de changement appréciable dans la quantité de chaleur transmise, ce qui prouve qu'une couche mince, de $0^{mm},5$ par exemple, ne produit pas d'absorption sensible de chaleur. Si donc l'on détache cette petite couche, de la lame, et qu'on la place en avant et parallèlement, la perte nouvelle qui résultera de cette séparation devra être attribuée aux réflexions sur les deux faces de la lame mince. En opérant ainsi on retrouve sensiblement le même nombre 0,077. Les petites différences que l'on rencontre sont probablement dues, en partie, à des différences dans le pouvoir réflecteur des différentes substances diathermanes également polies.

Réflexion sur les substances athermanes. — Melloni, en partant de ces faits, a pu évaluer la proportion de chaleur réfléchie par les corps athermanes. Il a d'abord constaté, au moyen d'une plaque de sel gemme, que la proportion de chaleur qui la traverse reste la même, quel que soit l'angle d'incidence quand il ne dépasse pas 30°, ce qui montre que la proportion de chaleur réfléchie reste aussi la même. Cela posé, on fait tomber des rayons de chaleur sur une grosse plaque de verre ou de cristal de roche, sous l'incidence de 25° ou 30°, et l'on note l'effet produit sur le thermo-multiplicateur, par les rayons réfléchis à la première surface. On remplace ensuite cette plaque par la lame dont on veut évaluer le pouvoir réflecteur ; on obtient un autre effet. Le rapport entre ces deux effets, multiplié par 0,0393, qui représente la proportion de chaleur réfléchie par le verre, donne la proportion réfléchie par le corps.

MM. de la Provostaye et P. Desains ont évalué la proportion de chaleur réfléchie par un certain nombre de métaux, par une méthode plus directe [1]. La lame réfléchissante *m* (*fig.* 568) est fixée verticalement au-dessus de l'axe d'articulation de deux règles horizontales LL, L*l*. La première soutient une lampe de Locatelli *s* et un écran *e* muni d'une ouverture verticale dont on peut

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XXII, p. 384.

faire varier la largeur. La règle L*l* porte la pile thermo-électrique *p*, et un écran *e'* percé d'une ouverture égale à la face de la pile. Ayant d'abord enlevé la lame *m*, on place la règle L*l* dans la direction de LL, et l'on observe quelle est la déviation produite sur l'aiguille du réomètre. On place ensuite la lame *m*, et au moyen du plateau fixe divisé *d* et de l'index *i* porté par la règle L*l*, on la dirige de manière que le faisceau de chaleur, après s'être réfléchi sur sa surface *m*, tombe sur la base de la pile. On obtient une nouvelle déviation dont le rapport à la première est égal au rapport cherché entre la quantité de chaleur émise et celle qui est réfléchie. Pour plus de sûreté, et pour se mettre à l'abri des erreurs provenant de changements accidentels dans l'intensité de la source, on mesure de nouveau la déviation produite sur la pile par les rayons directs, et c'est la moyenne entre cette déviation et celle qu'on a observée en premier lieu que l'on introduit dans le calcul. Enfin, comme vérification, on met les deux miroirs l'un après l'autre sur le support *d*, et l'on compare les effets produits. Ces effets doivent être dans le rapport des pouvoirs réfléchissants mesurés séparément. Les principaux résultats obtenus sont consignés dans le tableau ci-dessous (761).

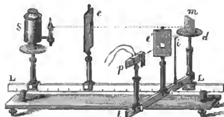


Fig. 568.

Tous les métaux cités avaient reçu l'action du marteau. Des expériences faites sur de l'or poli au marteau, ou déposé chimiquement sur une plaque d'acier; sur de l'argent fondu puis poli, ou martelé, ou déposé chimiquement sur du cuivre; sur du cuivre martelé ou déposé chimiquement sur du fer; sur du laiton écroui ou coulé; sur du platine en lame épaisse ou déposé chimiquement, ont prouvé que le pouvoir réflecteur des métaux, à degré de poli sensiblement égal, ne dépend que très peu de la manière dont on les a travaillés.

764. Variation du pouvoir réflecteur avec l'incidence. — Considérons d'abord les substances diathermanes. MM. de la Provostaye et P. Desains, en opérant sur le verre, au moyen de l'appareil (*fig.* 568), ont reconnu que le pouvoir réflecteur augmente rapidement avec l'angle d'incidence. Nous verrons, dans l'optique, que la lumière suit les mêmes lois, et que l'intensité R du rayon réfléchi, pour l'angle d'incidence *i* et pour l'angle de réfraction *r*, est donnée par la formule de Fresnel

$$R = \frac{1}{2}\left(\frac{\sin^2(i-r)}{\sin^2(i+r)} + \frac{\tang^2(i-r)}{\tang^2(i+r)}\right),$$

en représentant par 1 l'intensité du rayon incident. Si l'on compare les nombres donnés par cette formule pour le verre, avec ceux que l'expérience fournit

pour les rayons calorifiques, on trouve qu'ils sont égaux ; preuve nouvelle de l'identité des radiations lumineuses et calorifiques. Remarquons que les valeurs de R varient, pour la lumière comme pour la chaleur, avec celles de r, c'est-à-dire avec la réfrangibilité des divers rayons dont le mélange forme le faisceau incident ; mais les différences dans les déviations sont très petites et négligeables. Si l'on voulait en tenir compte, il suffirait d'opérer sur des rayons simples pris dans le spectre.

Pouvoir réflecteur des métaux. — Les substances métalliques se comportent tout autrement que le verre. MM. de la Provostaye et P. Desains ont trouvé que leur pouvoir réflecteur reste à peu près constant jusqu'à l'incidence de 70°, à partir de laquelle il *diminue*. Vers 80°, il est à peu près égal aux 0,94 de sa valeur sous les petites incidences.

Influence de la nature des rayons sur la réflexion métallique. — On a admis pendant longtemps que le pouvoir réflecteur des métaux ne dépendait pas de la nature des rayons incidents. MM. de la Provostaye et P. Desains ont prouvé qu'il en est autrement pour certains métaux. Le tableau qui suit contient les résultats qu'ils ont obtenus, l'angle d'incidence étant de 45° :

MÉTAUX.	LAMPE de Locatelli.	RAYONS solaires.	LAMPE à alcool salé.
Plaqué d'argent poli.	0,97	0,92	»
Or.	0,95	0,87	»
Laiton, cuivre.	0,93	»	0,945
Métal des miroirs, poli.	0,86	0,64	»
Etain.	0,85	0,60	0,86
Platine poli.	0,80	»	»
Acier.	0,83	0,60	0,88
Zinc.	0,81	»	»
Fer.	0,77	»	»
Fonte de fer.	0,74 à 0,75	»	»

Cette réflexion des différents flux en diverses proportions provient de leur différente composition, certaines espèces de rayons étant plus facilement réfléchies que d'autres par certains métaux.

MM. de la Provostaye et P. Desains ont constaté directement ce fait [1], sur les rayons simples d'un spectre solaire. Les proportions de chaleur réfléchies

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XXX, p. 276.

pour chaque espèce de rayon, ont été trouvées égales aux proportions réfléchies des rayons lumineux de même réfrangibilité; ce qui montre une fois de plus l'identité de cause de la chaleur et de la lumière coexistant dans le même rayon. Ce résultat se voit dans le tableau qui suit. Les nombres relatifs aux rayons lumineux ont été trouvés par M. Jamin, dans un travail sur la réflexion métallique, dont nous parlerons dans l'optique; l'incidence était de 70°.

MÉTAUX.	VERT DU SPECTRE.		ROUGE DU SPECTRE.		CHALEUR obscure.
	Chaleur.	Lumière.	Chaleur.	Lumière.	
Platine.	0,59	»	0,60	»	»
Zinc.	0,65	0,62	0,60	58	»
Métal des miroirs.	0,58	0,62	0,65	69	»
Laiton.	0,63	0,62	0,75	72	0,90

Tous les métaux réfléchissent la chaleur obscure en plus grande proportion que la chaleur lumineuse. Par exemple, l'acier réfléchit 0,75 des rayons obscurs pris à une distance de la bande rouge du spectre égale à l'espace qui la sépare du bleu, tandis qu'il ne réfléchit que 0,60 des rayons rouges. Certains rayons obscurs sont réfléchis par le laiton dans la proportion de 0,90.

Le verre se comportant comme un corps opaque par rapport aux rayons obscurs (733), on pouvait prévoir qu'il réfléchirait mieux les rayons d'une source à 150° que ceux d'une source lumineuse; c'est, en effet, ce qui a lieu.

On voit aussi que si l'on opère avec un faisceau de rayons solaires, le faisceau réfléchi n'aura pas la même thermochrôse que le faisceau incident. C'est, en effet, ce que l'expérience vérifie. La lumière présente un phénomène analogue; et c'est pour cela que l'or est jaune; le cuivre, rouge; l'aluminium, bleuâtre.

762. Pouvoir diffusif. — La proportion de chaleur réfléchie par diffusion dépend de la direction des rayons incidents, de leur nature et de l'inclinaison des rayons diffus. MM. de la Provostaye et P. Desains ont cherché les lois de ces phénomènes et sont arrivés à plusieurs résultats importants [1].

Incidence normale. — Les expériences ont été faites principalement sous l'incidence normale. Les effets à observer étant très faibles, on a employé les rayons solaires concentrés par une lentille de 10^{cm} d'ouverture. Un peu au-delà

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XXXIV, p. 192.

du foyer, le faisceau passait par l'ouverture d'un écran, et tombait sur la plaque dépolie. Le faisceau réfléchi par diffusion que l'on voulait étudier, était reçu par une seconde lentille, qui projetait sur la base de la pile du thermo-multiplicateur l'image de la partie de la plaque frappée par les rayons solaires. La disposition générale de l'appareil était celle de la *fig.* 568.

On a trouvé, par cette méthode, que lorsqu'on opère sur les substances granuleuses (céruse, cinabre, chromate de plomb, soufre lavé), l'intensité D des rayons diffus augmente proportionnellement au *cosinus* de l'angle *d* de ces rayons avec la normale. On a donc

$$D = \frac{c \cos d}{I} \qquad [1],$$

formule dans laquelle I représente l'intensité des rayons incidents, et c une constante qui dépend de la substance réfléchissante. Jusqu'à 25°, à 30° la valeur de D ne paraît pas varier sensiblement, ce qui permet d'évaluer la diffusion normale, qui ne peut être mesurée directement parce que la pile intercepterait le faisceau incident.

L'argent en poudre, le platine platiné, le verre noir dépoli, le noir de fumée ne suivent pas la loi du cosinus.

Quantités totales de chaleur diffusée. — Cette quantité se compare à la quantité de chaleur incidente; mais comme celle-ci est trop intense, on la mesure après l'avoir affaiblie par la réflexion sur un verre noir, dans un rapport donné par la formule du n° (760). On fait ensuite la somme des rayons diffusés dans toutes les directions, en divisant la sphère ayant son centre au centre de la plaque, et ayant pour rayon la distance de ce point à la pile, en zones très étroites, par des plans parallèles à cette plaque. La chaleur reçue sur l'unité de surface de chaque zone se déduira de la formule [1], quand on connaîtra la valeur de *d* qui lui correspond, et quand la constante c aura été déterminée par une expérience directe. On a trouvé ainsi, pour les quantités totales de rayons diffusés, sur 100 tombant normalement,

Céruse	*Chromate de plomb*	*Cinabre*	*Argent en poudre*
82	66	48	76

L'argent en poudre ne suivant pas la loi du cosinus, le nombre qui lui correspond a été calculé par approximation.

Incidence oblique. — La diffusion totale et la distribution des rayons diffus autour de la normale dépendent de l'angle d'incidence. Cependant, pour les substances qui suivent la loi du cosinus, les résultats restent sensiblement les mêmes tant que l'angle d'incidence ne dépasse pas 30°. Au-delà et *dans le plan d'incidence*, la diffusion maximum a lieu suivant la normale ; et, en faisant

varier l'angle d'incidence et prenant toujours l'angle de diffusion égal, on trouve un *minimum*. L'argent en poudre, le platine platiné, donnent un maximum dans la direction des rayons réfléchis spéculairement.

Nous ajouterons que M. Knoblauch, ayant étudié les rayons diffus sous des incidences variant de 2° à 80°, a vu que l'or, l'argent, le cuivre, le laiton dépolis donnent, pour les grands angles, des rayons diffus qui passent plus facilement à travers un verre jaune que ceux qui sont obtenus sous les incidences voisines de la normale. Ces métaux se rapprochent à cet égard des substances mates dont la couleur varie quand on les regarde plus ou moins obliquement.

On voit que les lois de la diffusion sont loin d'être complètement connues; elles dépendent du reste de l'état de polarisation (745) des rayons calorifiques, et MM. de la Provostaye et Desains, dans les expériences que nous avons citées, ont particulièrement étudié les phénomènes à ce point de vue.

III. Pouvoir absorbant.

763. Expériences de Leslie. — La faculté plus ou moins grande que possèdent les corps de laisser passer par leur surface une partie de la chaleur incidente, pour se l'approprier et s'échauffer, constitue le *pouvoir absorbant* ou *admissif* de ces corps; on le mesure par le rapport entre la quantité de chaleur reçue et celle que le corps retient. Ce pouvoir dépend de la nature de la couche superficielle. Musschenbroeck avait remarqué que la terre noire des marais s'échauffe plus vite, sous l'influence des rayons solaires, que le sable blanc des dunes. Il constata que des morceaux de bois recouverts de différentes substances s'échauffent inégalement, et que ceux qui sont noirs s'échauffent plus que les autres. Scheele reconnut aussi qu'un miroir sphérique noirci s'échauffait fortement quand il le présentait à l'ouverture d'un poêle, tandis que le même miroir, avec sa surface brillante, ne s'échauffait pas sensiblement.

Pour comparer les pouvoirs absorbants des différents corps, Leslie plaçait au foyer du miroir de son appareil, le réservoir d'un thermomètre recouvert successivement des différentes substances à essayer. Plus le thermomètre montait, plus le pouvoir absorbant était considérable. Leslie a trouvé par ce moyen que les rayons lancés par une boîte d'étain noircie et remplie d'eau bouillante, faisaient monter le thermomètre focal à 100° quand sa surface était nue, et à 20° seulement, quand elle était recouverte d'une feuille d'étain. Si le vase d'étain conservait sa surface métallique, le thermomètre nu montait de 12°, et le thermomètre recouvert d'étain, de 2°,5.

La méthode de Leslie ne peut donner les rapports entre les pouvoirs absorbants. En effet, le thermomètre devient stationnaire, quand il perd par le rayonnement et le contact de l'air autant de chaleur qu'il en reçoit; mais ses

pertes ne sont pas, dans les différents cas, proportionnelles aux excès de température sur le milieu ambiant, puisque la nature de la surface n'est pas la même, et que les substances qui ont le plus grand pouvoir émissif perdent plus rapidement la chaleur que les autres, à égalité d'excès de température sur le milieu environnant.

Melloni a comparé les pouvoirs absorbants par une autre méthode; il plaçait, en face de la pile du thermo-multiplicateur, des disques de cuivre mince noircis du côté de celle-ci, et recouverts des substances à essayer du côté opposé, qui reçoit les rayons émanant de la source de chaleur. Cette méthode ne donne pas les rapports absolus des pouvoirs absorbants, par la même raison que nous venons d'indiquer pour celle de Leslie; aussi Melloni ne l'a-t-il donnée que comme propre à indiquer, de deux substances, quelle est celle qui a le plus grand pouvoir absorbant. Voici quelques-uns des résultats qu'il a trouvés, en prenant pour source de chaleur un vase cubique à 100°.

Noir de fumée	100	Encre de Chine	85
Céruse	100	Gomme laque	72
Colle de poisson	91	Métaux	13

Il est à remarquer que l'ordre, dans lequel se trouvent ces substances, est le même que pour les pouvoirs émissifs. Nous verrons aussi qu'il peut être différent quand on emploie d'autres sources.

Ayant comparé les pouvoirs absorbants de différents tissus blancs, collés sur les disques, Nobili et Melloni ont trouvé l'ordre suivant : *soie*, *laine*, *coton*, *lin* et *chanvre*, la soie ayant le plus grand pouvoir. Pour les métaux, ils ont trouvé la série : *plomb* et *étain*, *fer*, *acier*, *or*, *argent*, *cuivre*; ils font remarquer que cet ordre est à peu près l'inverse de celui qui correspond à la faculté plus ou moins grande que possèdent les corps de laisser passer la chaleur de molécule à molécule. Cette remarque s'applique également aux tissus.

764. Influence du poli. — Leslie avait trouvé qu'en rayant la surface d'une lame métallique, on augmentait son pouvoir absorbant. Melloni a reconnu que les différences proviennent, comme pour le pouvoir émissif (753) de ce que les raies mettent à découvert des parties moins denses que la couche superficielle écrouie par le passage au laminoir. Voici quelques-unes des expériences faites à ce sujet. De deux disques de fer-blanc noircis du côté tourné vers la pile, l'un avait été battu à petits coups avec un marteau, de manière à être couvert de bosselures, l'autre était resté à l'état naturel. La chaleur provenant d'une même source échauffa davantage ce dernier, quoiqu'il fût plus brillant que l'autre, ce qui se reconnaissait à l'effet produit sur la pile, par la face noircie. Le pouvoir absorbant est donc diminué, comme le pouvoir émissif, par un accroissement de densité. Des lames d'or et d'argent, coulées et refroidies lentement, absorbent plus de chaleur quand elles sont polies qu'après qu'on

les a rayées avec un diamant : c'est que la pointe comprime et écrouit le métal au fond des raies. Les substances qui ne peuvent s'écrouir, comme le jayet, le marbre, l'ivoire, ont le même pouvoir absorbant, quand elles sont polies et quand elles sont rayées dans divers sens.

Il résulte de là, qu'en augmentant la densité d'un métal on diminue la proportion de chaleur qu'il absorbe, et que, par conséquent, on augmente celle qui est réfléchie. Il est donc utile d'écrouir à coups de marteau les miroirs sphériques. Dulong ayant fait construire des miroirs conjugués travaillés au tour, leur trouva beaucoup moins de puissance calorifique qu'à deux petits miroirs moins soignés et travaillés au marteau ; résultat facile à expliquer. Les expériences citées plus haut (759) semblent établir que la manière dont les métaux ont été travaillés n'a que très peu d'influence sur le pouvoir réflecteur ; mais remarquons qu'une très petite différence, inappréciable dans le faisceau calorifique de l'appareil (*fig.* 568), peut devenir très sensible au foyer d'un large miroir sphérique.

765. Du pouvoir absorbant pour les différents rayons. — La chaleur absorbée par un corps est égale à celle qu'il reçoit, diminuée des quantités qui sont réfléchies spéculairement et d'une manière diffuse. Or, celles-ci varient avec la nature des rayons incidents (761) ; il doit donc en être de même de la quantité absorbée. C'est, en effet, ce qui a lieu : Melloni ayant recouvert de noir de fumée l'une des faces de la pile thermoscopique, et l'autre face d'une autre substance, de blanc de céruse, par exemple, il a reconnu que des rayons venant d'une lampe de Locatelli, et ayant traversé des plaques de différentes substances, produisaient sur les deux faces des effets dont les rapports changeaient suivant la nature des rayons incidents. Les rayons ayant traversé l'alun sont ceux qui sont le moins absorbés par la face blanchie, ce qui s'explique, puisque l'alun, peu diathermane (727), ne laisse passer que les rayons les moins susceptibles d'être absorbés. Les rayons qui ont franchi un verre noir sont, au contraire, absorbés en grande proportion ; c'est que le verre noir arrête les rayons calorifiques lumineux, qui sont les plus faciles à transmettre, ceux qui restent sont donc les plus faciles à absorber. Quand la chaleur de la lampe traversait des lames de verre, alun, verre noir, sel gemme, les pouvoirs absorbants étaient représentés par 80, 54, 43, 84, 80, celui du noir de fumée étant représenté par 100.

M. Baden-Powel, puis Melloni, ont reconnu que les pouvoirs absorbants de certaines substances varient avec la nature de la source. Melloni employait la méthode que nous avons déjà indiquée (763). Le tableau suivant contient une partie des résultats qu'il a obtenus ; la variation du pouvoir absorbant avec la nature du flux calorifique s'y reconnaît facilement.

On a représenté par 100 le pouvoir absorbant du noir de fumée, pour chaque source ; alors les nombres inscrits restent les mêmes, pour une même source, à quelque distance qu'on la place de la pile.

SUBSTANCES.	LAMPE d'Argant.	LAMPE de Locatelli.	PLATINE incandescent.	CUIVRE à 400°.	CUIVRE à 100°.
Noir de fumée. .	100	100	100	100	100
Encre de Chine. .	100	96	95	87	85
Céruse.	21	53	56	89	100
Colle de poisson. .	45	52	54	64	91
Gomme laque. . .	30	43	47	70	72
Surface métallique	17	14	13,5	13	13

766. Constance du pouvoir absorbant du noir de fumée. — Ici se présente une question importante ; celle de savoir si le noir de fumée absorbe également toute espèce de rayons. Il faudrait, pour le savoir, exposer la face noircie de la pile, à des rayonnements de même intensité émanant de différentes sources ; mais comment reconnaître l'égalité d'intensité, puisque l'on ne sait pas si les rayons de différente espèce sont absorbés en même proportion ? Melloni emploie alors la méthode du n° 742[1]. L'expérience montre que les effets des deux faces du disque noirci des deux côtés, sont toujours dans le même rapport, $\frac{5}{6}$ environ. On en doit conclure que le *noir de fumée absorbe également toutes les espèces de rayons*, faculté précieuse que l'on peut mettre à côté de celle du sel gemme, relative à la transmission, et sans laquelle on ne pourrait comparer les intensités de flux calorifique de nature différente. Il faut donc recouvrir les thermoscopes ou thermomètres de noir de fumée, quand on veut comparer les radiations de sources différentes, autrement les indications dépendraient du pouvoir absorbant et diathermane des surfaces sur lesquelles tomberaient les rayons, et ces indications ne seraient pas proportionnelles aux intensités des radiations, quand elles émaneraient de sources différentes. La plupart des métaux présentent la même propriété que le noir de fumée relativement à l'absorption égale de toutes les espèces de rayons ; car si l'on met devant la pile un disque noir des deux côtés, puis un disque métallique noirci du côté de la pile, et bien décapé et dépoli du côté de la source, on trouve le même rapport entre les effets produits, quelle que soit l'origine des rayons. Ce résultat devait se prévoir pour les métaux *leucothermiques*, c'est-à-dire qui réfléchissent également toutes les espèces de rayons ; mais il ne peut être qu'approximatif pour ceux qui sont thermochroïques.

767. Rapports des pouvoirs absorbants. — Les méthodes que nous avons indiquées ne donnent pas, comme nous l'avons dit, les rapports entre les

[1] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. LXXV, p. 337.

pouvoirs absorbants des différentes substances. Pour obtenir ces rapports, MM. de la Provostaye et P. Desains ont imaginé la méthode suivante [1]. Quand un thermomètre reçoit la chaleur d'une source, il commence par monter, puis il reste stationnaire, lorsque la chaleur qu'il reçoit pendant chaque minute est égale à celle qu'il perd par le contact de l'air et par rayonnement. Or, la chaleur perdue se mesure par la vitesse du refroidissement. Si donc le thermomètre était recouvert successivement de deux substances différentes, et si l'on évaluait les vitesses de refroidissement dans les deux cas quand ce thermomètre est devenu stationnaire, le rapport de ces vitesses serait égal à celui des pouvoirs absorbants, puisque, dans l'état stationnaire, la chaleur absorbée est à chaque instant égale à la chaleur perdue.

Cela posé, voici comment on procède : Un thermomètre très sensible, revêtu successivement des substances à comparer, est placé, toujours dans la même position, un peu au-delà du foyer d'une lentille qui concentre sur sa boule les rayons du soleil, ou ceux d'une lampe modérateur. Quand il est devenu stationnaire, on masque la source, et l'on détermine les vitesses de refroidissement correspondantes à cette température et aux températures voisines. Opérant de même sur d'autres substances, les rapports des vitesses de refroidissement pour les températures stationnaires font connaître le rapport des pouvoirs absorbants. Voici les résultats trouvés par cette méthode :

	Chaleur solaire.	Lampe d'Argant.
Noir de platine.	»	100
Cinabre.	»	28,5
Blanc de céruse.	19	21
Argent en poudre.	»	21
Argent en feuilles.	7,5	»
Or en feuilles.	13	4

768. Proportion de chaleur absorbée sous l'incidence normale. — La chaleur qui tombe sur un corps *athermane* se partage généralement en trois parties : la première a est absorbée, la seconde r est réfléchie spéculairement, et la troisième d réfléchie par diffusion. On a donc, en appelant 100 la chaleur incidente, $a+r+d=100$, d'où $a=100-(r+d)$. Quand la substance est, comme les métaux polis, sensiblement dépourvue de pouvoir diffusif, on a $a=100-r$, et comme r est connu (761), on pourra calculer a. La valeur de r dépend de la nature des rayons incidents, il en sera donc de même de celle de a. C'est ainsi que MM. de la Provostaye et Desains ont obtenu les résultats suivants :

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XXX, p. 431.

MÉTAUX.	RAYONS solaires.	LAMPE à modérateur.	LAMPE de Locatelli.	LAMPE à alcool salé.	LAME DE CUIVRE à 400°.
Acier.	42	34	17,5	12	»
Métal des miroirs.	34	30	14,5	»	»
Platine	39	30	17	14	10,5
Zinc.	»	32	19	»	»
Etain.	»	32	15	»	»
Laiton.	»	16	7	6	5,5
Or.	43	»	4,5	»	4,5
Plaqué d'argent. .	8	8	2,5	»	»

Ces valeurs restent sensiblement les mêmes sous des incidences obliques inférieures à 70°. Pour les substances opaques non métalliques, comme le verre noir, qui réfléchissent de la même manière toutes les espèces de rayons, le pouvoir absorbant ne change pas avec la source.

Dans le cas des incidences obliques, il faut remplacer r par sa valeur calculée par les moyens indiqués ci-dessus (761). Comme r augmente, en général, avec l'angle d'incidence, on voit que le pouvoir absorbant diminuera quand cet angle augmentera.

Quand il s'agit de substances dénuées de réflexion spéculaire, on a $r = 0$ et $a = 100 - d$; et nous avons vu comment on peut calculer d (762). On trouve ainsi les pouvoirs absorbants suivants, dans le cas de l'incidence normale.

Céruse	*Chromate de plomb*	*Cinabre*	*Argent en poudre*
18	34	52	24

769. Comparaison des pouvoirs émissif et absorbant. — La série des corps rangés par ordre de pouvoirs absorbants est la même que celle des mêmes corps rangés par ordre de pouvoirs émissifs. Les corps qui rayonnent le plus de chaleur sont donc aussi ceux qui en absorbent le plus. On a reconnu d'abord que *les pouvoirs émissifs sont proportionnels aux pouvoirs absorbants*, au moyen de l'expérience suivante, attribuée à Ritchie. On prend un thermomètre différentiel *amn* (*fig.* 569), dont les boules sont remplacées par des réservoirs cylindriques en métal, ayant leurs bases parallèles. La base *n* est couverte de noir de fumée, et la base *a* est argentée ; entre les deux réservoirs *a* et *n* est placé un vase cylindrique AN, de même diamètre, et dont la face N est recouverte de noir de fumée, tandis que la face A est argentée.

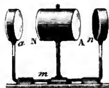


Fig. 569.

L'expérience montre que les deux réservoirs *a* et *n* indiquent la même température, quand le vase AN est à égale distance de chacun d'eux. On conclut de là que les pouvoirs émissifs du noir de fumée et de l'argent sont proportionnels à leurs pouvoirs absorbants. En effet, soient T la température du vase AN, *t* celle des réservoirs *a* et *n* quand ils sont stationnaires, *a* et *n* les pouvoirs absorbants de l'argent et du noir, A et N leurs pouvoirs émissifs, et enfin *d* les distances *a*N et A*n*, et S la surface des bases des cylindres. La quantité de chaleur que reçoit la face *n*, de chaque point de la surface A, est proportionnelle au pouvoir émissif de cette dernière et au pouvoir absorbant de la face *n*, c'est-à-dire à A*n*. Cette quantité dépend ensuite de la distance *d*, de l'étendue de la surface S, et des températures T et *t*. Cette quantité de chaleur est donc représentée par une expression de la forme $An \times F\,(S,\, d,\, T,\, t)$. Celle que reçoit le réservoir *a* est, de même, proportionnelle à N*a*, et est liée aux quantités S, *d*, T, *t*, de la même manière que la quantité de chaleur reçue par l'autre réservoir. La forme de la fonction F sera donc la même, et l'on aura pour représenter la chaleur reçue par le réservoir *a*, l'expression $Na \times F\,(S,\, d,\, T,\, t)$. Les quantités de chaleur reçues par les deux réservoirs étant égales quand le vase AN est à égale distance, on a la relation $An \times F\,(S,\, d,\, T,\, t) = Na \times F\,(S, d, T, t)$, ou $An = Nd$, égalité qui contient la proportion énoncée. En remplaçant le noir de fumée et l'argent par d'autres substances, on arrive au même résultat.

Egalité des pouvoirs émissifs et absorbants. — L'expérience prouve en outre que le pouvoir émissif et le pouvoir absorbant d'une même substance sont représentés par le même nombre. On emploie, pour le prouver, un appareil imaginé par Dulong et Petit pour étudier les lois du refroidissement (784). Un ballon en cuivre B (*fig.* 570), recouvert intérieurement de noir de fumée, renferme un thermomètre T, dont la boule en occupe le centre. La surface de ce thermomètre est revêtue de la substance dont on veut comparer les pouvoirs. On peut observer la température qu'indique le thermomètre, à travers un tube de verre *t*, appuyé sur un plateau *ba* usé à l'émeri, et qui s'applique exactement sur le col du ballon. Le tube *t* est muni d'un robinet *r*, auquel on adapte un tuyau en plomb, par lequel on peut faire le vide dans l'appareil. Le ballon B est plongé dans un bain dont on connaît la température.

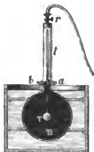


Fig. 570.

L'expérience consiste à mesurer le temps que met le thermomètre à s'élever d'une petite quantité, lorsque sa température est inférieure à celle du ballon d'un certain nombre de degrés; puis le temps qu'il met à se refroidir de la même quantité quand sa température dépasse celle du ballon, du même nombre de degrés. Par exemple, le bain étant à 10°, on porte le thermomètre à 0°, en le plongeant dans la glace fondante, puis on l'ajuste au col du ballon, on place le tube *t* et l'on fait le vide. Pendant ces diverses opérations le thermo-

mètre monte; on attend qu'il ait atteint 5°. Alors on mesure le temps qu'il met à monter de 1°. En second lieu, on entoure le ballon de glace fondante, et l'on porte le thermomètre à 10°; on l'ajuste à l'appareil, on fait le vide, et l'on observe le temps qu'il met à s'abaisser, de 5° à 4°. On trouve que ce temps est égal à celui qu'avait employé l'instrument pour monter de 1°, dans la première opération, où la différence de température était la même, mais de signe contraire. Or, l'échauffement et le refroidissement ne peuvent provenir que du pouvoir absorbant et du pouvoir émissif du thermomètre, puisque l'air a été extrait de l'appareil; de plus, la loi de Newton (748) est applicable pour d'aussi petites différences de température. La chaleur est donc absorbée aussi vite qu'elle est perdue par la boule du thermomètre; d'où l'on doit conclure l'égalité du pouvoir émissif et du pouvoir absorbant, du moins dans les conditions de cette expérience, c'est-à-dire dans les limites où la loi de Newton peut s'appliquer.

Cette égalité peut encore se conclure, suivant la remarque de M. Despretz, de l'équilibre de température d'un corps renfermé dans une enceinte. Ce corps prend la même température que l'enceinte, et alors il doit nécessairement recevoir par absorption autant de chaleur qu'il en perd par le rayonnement.

Fourier a expliqué de la manière suivante l'égalité des deux pouvoirs, dans un corps dont la température est constante, quand il reçoit autant de chaleur qu'il en perd. Considérons un rayon incident dont l'intensité est i. Le corps en absorbera une fraction ni et réfléchira spéculairement ou d'une manière diffuse l'autre partie $i - ni = i(1-n)$; de sorte que les quantités n et $(1-n)$ représenteront les pouvoirs absorbant et réflecteur de la couche superficielle du corps. La température étant la même que celle de l'enceinte, un rayon qui se présente pour sortir possède aussi une intensité i, et une partie ni seulement, égale à celle qui a été absorbée, doit sortir pour que la température du corps ne varie pas. Il y a donc une portion $i(1-n)$ qui ne peut passer et qui est réfléchie en dedans, dans la même proportion que celle qui a été réfléchie en dehors. Ce raisonnement suppose que tous les rayons sont de même nature.

770. Comparaison des deux pouvoirs dans les températures élevées. — Les expériences par lesquelles on a prouvé l'égalité des pouvoirs émissif et absorbant n'ont été faites que jusqu'à 300°. Or, nous savons que le pouvoir émissif varie au-dessus de cette température (752), et que le pouvoir absorbant change avec la nature de la source qui envoie les rayons (765); on doit donc se demander si l'égalité entre les deux pouvoirs a encore lieu aux températures élevées. Pour le noir de fumée, qui absorbe de la même manière toutes les espèces de rayons, on peut admettre qu'il en est ainsi. Quant aux autres substances, il faudrait, d'après la théorie de Fourier (769), que la nature des rayons qui se présentent pour sortir changeât avec la température, la réflexion *intérieure* modifiant le mélange comme le ferait une réflexion extérieure; ce qui n'a rien d'invraisemblable. Cependant la question est assez complexe dans

certain cas. Par exemple, le blanc de céruse présente le même pouvoir émissif que le noir de fumée, et son pouvoir absorbant varie en sens inverse de son pouvoir diffusif, qui est considérable et augmente avec la température de la source qui fournit les rayons incidents (742). Il faudrait donc, pour que les deux pouvoirs fussent égaux dans les températures élevées, que le pouvoir émissif de la céruse diminuât avec la température, comme pour le borate de plomb (752). Pour que cette condition fût remplie, il suffirait d'admettre qu'il existe une diffusion intérieure soumise aux mêmes lois que la diffusion extérieure. Quoi qu'il en soit, ce point demande de nouvelles recherches.

Quand la température d'un corps n'est pas constante, c'est-à-dire quand il s'échauffe ou se refroidit, il peut se faire que l'égalité du pouvoir absorbant et du pouvoir rayonnant n'ait plus lieu. Par exemple, si l'on expose au soleil deux disques de bois identiques, recouverts, l'un de noir de fumée, l'autre de blanc de céruse, qui ont le même pouvoir émissif, le disque noirci s'échauffe beaucoup plus vite que le disque blanc. Cela tient à la grande quantité de chaleur diffuse que réfléchit la céruse, tandis que le noir de fumée n'en réfléchit qu'une quantité à peine appréciable.

Identité de la chaleur en équilibre dans les corps. — La chaleur qui a pénétré dans un corps dont la température est constante, ne présente plus de différences de qualités. Ces différences ne se manifestent que dans l'état de mouvement de la chaleur hors des corps, et ne sont que des états particuliers du mouvement vibratoire qui constitue les rayons. M. Lamé compare l'équilibre de la chaleur dans un corps à celui d'un liquide dans un vase; ce n'est qu'en s'écoulant par un orifice que le liquide présente des phénomènes particuliers, des vitesses variant avec la charge, et que les effets de la viscosité se manifestent.

771. Explication de quelques phénomènes. — Quand il fait soleil, on remarque que la neige fond plus vite sous les arbres et autour des buissons, que dans les endroits qui reçoivent directement les rayons solaires. M. Fusinieri a fait, en 1838, un grand nombre d'observations sur ce sujet; il a constaté que des branches de bois mort produisent le même effet que le bois vif, ce qui écarte l'idée de l'influence d'une chaleur propre aux plantes. Ces faits lui parurent tout à fait inexplicables. Melloni en a facilement rendu compte, en remarquant que les rayons émis par les branchages échauffés, sont d'une autre nature que les rayons directs du soleil, et plus facilement absorbés par la neige que ceux-ci[1]. Pour appuyer cette explication, Melloni a garni de blanc de céruse la base de la pile du thermo-multiplicateur, et a fait tomber sur cette base les rayons d'une lampe, concentrés par une lentille : la déviation était de 15°. Ayant interposé tout près de la pile une feuille de papier épais, gris foncé, la déviation augmenta jusqu'à 33°,5. Les rayons moins intenses partant du papier produisaient donc plus d'effet que les rayons directs, parce qu'ils

[1] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. LXVIII, p. 341.

étaient d'une nature différente et absorbés en plus grande proportion. De la chaleur obscure émanant d'un verre noir donna un résultat semblable ; la déviation était de 18° à 19° pendant l'interposition du papier gris, tandis qu'elle n'était que de 10° à 11° en l'absence du papier. Pour prouver que la neige est dans le même cas que la céruse, Melloni plaça une pile armée de ses deux tubes, entre une lampe d'Argant et une plaque de cuivre à 400°, de manière que la déviation fût nulle ; il remplaça ensuite la pile par un tube ayant les mêmes dimensions que son enveloppe, et partagé en deux parties égales par une cloison perpendiculaire à son axe, et dans chaque compartiment duquel il avait mis de la neige pure occupant le même espace que la pile thermo-électrique ; la température de l'air était de — 3°. La neige tournée du côté du cuivre à 400° se fondit beaucoup plus vite que celle qui se trouvait du côté opposé. Enfin, ayant rempli un vase, de neige bien unie à la surface, il l'exposa au rayonnement d'une lampe, après avoir suspendu au-devant de la partie centrale, un disque de carton mince noirci des deux côtés. La neige fondit et se creusa derrière le disque, beaucoup plus que dans les parties qui recevaient directement les rayons de la lampe. Celle-ci ayant été remplacée par une lame de cuivre à 400°, il se produisit un effet inverse.

La propriété que possèdent à divers degrés les différentes substances de laisser passer la chaleur par leur surface, ou de la réfléchir, peut servir aussi à expliquer divers phénomènes. La neige ne fond que lentement au soleil, parce qu'elle diffuse la plus grande partie de la chaleur incidente ; mais si l'on répand du charbon en poudre sur sa surface, elle fond rapidement, à cause de la chaleur que lui communiquent par contact les parcelles de charbon qui absorbent rapidement les rayons solaires. On peut ainsi faire fondre la neige suivant des lignes qui forment des dessins, au moyen de poussières de charbon, assez rares pour n'être pas visibles. Une pierre posée sur de la glace, la fait fondre aux points où elle la touche, après avoir absorbé les rayons du soleil. La neige préserve du froid les terres qu'elle recouvre, à cause de son faible pouvoir rayonnant.

Les animaux des régions boréales ont généralement le pelage blanc, par exemple, les ours blancs ; d'autres changent de couleur à chaque saison et deviennent blancs en hiver, de manière que la chaleur de leurs corps se perd moins facilement par le rayonnement, le poil blanc ayant un grand pouvoir diffusif, qui renvoie en dedans les rayons émis par la peau.

Les nègres doivent à la couleur noire de leur peau de supporter plus facilement que les blancs, la chaleur des climats chauds ; le pouvoir émissif considérable de leur peau les débarrasse d'une partie de la chaleur de leur corps. Il est vrai qu'ils devraient souffrir davantage sous l'influence directe des rayons solaires ; mais, dans ce cas, il transsude de leur peau une matière huileuse qui réfléchit une grande partie de la chaleur incidente, et modifie le pouvoir absorbant. Les habits noirs laissent perdre plus facilement la chaleur que les vêtements blancs, à égalité d'épaisseur et de nature des tissus. Les étoffes blanches sont préférables pendant l'été parce qu'elles renvoient par réflexion diffuse une grande

partie de la chaleur incidente ; le linge blanc porte un obstacle efficace à la déperdition de la chaleur du corps ; les rayons envoyés par la peau sont diffusés en dedans et retournent vers le corps, partout où le linge n'est pas immédiatement en contact avec sa surface.

772. Applications. — Un poêle doit être recouvert d'un enduit noir, si l'on veut qu'il émette beaucoup de chaleur ; s'il est en cuivre poli et brillant, il peut échauffer l'air qui le touche, mais il rayonne à peine, quoique brûlant. C'est par la même raison que les liquides se refroidissent lentement dans des vases d'argent, de cuivre, de porcelaine blanche vernie. Pour faire chauffer rapidement un liquide, il faut que le vase qui le contient soit noirci dans les parties qui reçoivent l'action du feu, et brillant dans toutes les autres parties. On peint en noir les murs des jardins sur lesquels s'appuient les espaliers, pour que les rayons solaires qui frappent ces murs soient absorbés, puis renvoyés par rayonnement sur le côté des fruits qui ne reçoit pas les rayons solaires. Une chambre dont les parois seraient dorées s'échaufferait très vite sous l'influence d'un foyer intérieur, parce que les rayons calorifiques qui se présenteraient pour sortir seraient réfléchis ; cependant les murs resteraient froids au toucher.

§ 5. — DE L'ÉQUILIBRE DE LA CHALEUR RAYONNANTE.

773. Equilibre mobile de température. — Quand plusieurs corps se trouvent dans une même enceinte dont les parois possèdent la même température que chacun d'eux, la quantité de chaleur qu'ils contiennent ne varie pas. On peut expliquer ce résultat de deux manières différentes : ou bien en supposant que ces corps ne rayonnent pas de chaleur et n'en reçoivent pas, ou bien en admettant que l'enceinte et les corps rayonnent les uns vers les autres et échangent des rayons de même intensité, de manière que, perdant autant qu'ils reçoivent, leur température reste stationnaire. Si les pouvoirs absorbants et réflecteurs de ces différents corps ne sont pas les mêmes, cette circonstance ne changera rien au résultat, car si un corps recoit des rayons d'intensité i, il en absorbera une partie ni et réfléchira l'autre, égale à $i(1-n)$. Or, il émet aussi une quantité égale à ni, le pouvoir émissif étant égal au pouvoir absorbant ; il enverra donc aux autres corps la quantité ni, augmentée de la quantité réfléchie $i(1-n)$, c'est-à-dire en tout $ni+i(1-n)=i$. Par conséquent il enverra la quantité même qu'il a reçue ; il ne gagnera donc ni ne perdra de chaleur.

Si un corps est plus froid que ceux qui l'environnent, il s'échauffe en recevant plus de chaleur qu'il n'en émet, d'après la loi de Newton ; s'il est plus chaud, il lance des rayons plus intenses que ceux qu'il reçoit, et il perd de la chaleur jusqu'à ce qu'il y ait équilibre de température entre tous les corps de

l'enceinte; alors les échanges de chaleur se font également. La température finale ne dépend ni de la masse, ni de la forme, ni de la nature, ni enfin de la position et du nombre des corps; mais la rapidité avec laquelle l'équilibre s'établit dépend de la masse du corps, de l'état de sa surface, de sa capacité calorifique, et enfin du fluide environnant.

Cette théorie, connue sous le nom d'*équilibre mobile de température*, a été donnée par Pierre Prevost, de Genève, en 1791. Elle est aujourd'hui exclusivement adoptée. En effet, elle est bien en harmonie avec l'idée que nous nous faisons de la mobilité de la chaleur, et rend facilement compte de la plupart des phénomènes; tandis que l'autre système, indépendamment de la difficulté de concevoir l'état de repos dans un agent aussi mobile que la chaleur, offre à chaque pas des difficultés. Par exemple, si un corps est placé dans une enceinte dont la température soit plus élevée que la sienne, il s'échauffe au moyen des rayons qu'il reçoit des différents points de l'enceinte. Il faudrait donc admettre que ce corps provoque par sa présence le rayonnement de l'enceinte vers lui, et seulement dans sa direction, car les autres corps, qui ont même température que l'enceinte, ne doivent pas recevoir de chaleur, puisqu'ils ne s'échauffent pas. Fourier a précisé le principe de Prevost et en a développé les conséquences dans sa théorie mathématique de la chaleur. Laplace et Poisson l'ont aussi adopté, dans leurs travaux sur la chaleur, et aujourd'hui il est admis de tous les physiciens.

Avant de développer les principales conséquences de cette théorie, nous allons établir quelques principes sur lesquels nous aurons à nous appuyer.

774. I. Variation de l'intensité de la chaleur avec la distance. — Nous entendons par *intensité* de la chaleur que reçoit un corps, la quantité qui tombe sur l'unité de surface. *Cette intensité varie en raison inverse du carré de la distance*. Pour le démontrer par le raisonnement, considérons un point o d'où émanent dans tous les sens des rayons calorifiques, et soient s et s' deux surfaces sphériques ayant ce point pour centre, et dont les rayons sont d et d'. La totalité de la chaleur émanant du point o traverse chacune de ces deux surfaces. L'*intensité*, c'est-à-dire la portion de cette chaleur reçue par l'unité de surface, sera donc d'autant plus petite que la surface sphérique sera plus grande, et l'on aura, en désignant par i et i' les intensités aux distances d et d', et par s et s' les aires des surfaces sphériques,

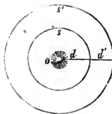


Fig. 574.

$$i : i' = s' : s, \qquad \text{ou} \qquad i : i' = d'^2 : d^2;$$

car les surfaces des sphères sont entre elles comme les carrés de leurs rayons d et d'. Cela suppose que chaque rayon de chaleur conserve individuellement la même intensité; ce qui a lieu dans le vide. Dans l'air il y a une

faible absorption, mais elle est insensible pour les distances que l'on considère ordinairement.

On voit que ce principe résulte de ce que les rayons qui partent du point o vont en divergeant; s'ils étaient parallèles, comme lorsque le point rayonnant est au foyer d'un miroir parabolique, l'intensité ne varierait pas avec la distance.

Pour vérifier ce principe par l'expérience, on emploie l'appareil de Leslie (*fig.* 565); on fait varier la distance de la source calorifique au miroir sphérique, et l'on trouve que les différences de température des deux boules du thermoscope sont t, $\frac{1}{4}t$, $\frac{1}{9}t$....., quand les distances de la source au miroir sont 1, 2, 3..... Dans cette expérience, la surface constante du miroir reçoit des quantités de chaleur de plus en plus petites. Si le miroir augmentait d'étendue à mesure qu'on l'éloigne du cube, de manière à former la base d'un même cône de rayons ayant son sommet à la source de chaleur, l'effet produit sur le thermoscope serait constant.

Le ballon vide de Rumfort (713) peut aussi servir à prouver le principe qui nous occupe: quel que soit son diamètre, le thermomètre monte de la même quantité. Or, quand la surface du ballon est 2, 3, 4.... fois plus grande, le nombre de points qui rayonnent vers le centre est 2, 3, 4.... fois plus grand. Il faut donc pour compenser, que l'intensité des rayons reçus par la boule du thermomètre soit 2, 3, 4.... fois plus petite, ou en raison inverse de la surface, ou du carré du rayon du ballon. Leslie ayant placé successivement des boîtes d'étain à la même température, et de grandeurs différentes, en face de la boule d'un thermoscope, de manière que l'angle sous-tendu ayant son sommet au centre de la boule, fût toujours le même, vit l'index du thermoscope conserver toujours la même position.

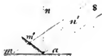


Fig. 572.

775. II. Intensité de la chaleur reçue obliquement. — *L'intensité de la chaleur reçue par une surface, est proportionnelle au cosinus de l'angle que font les rayons incidents avec la normale à cette surface.* En effet, soit s un faisceau de rayons incidents; nous pouvons le regarder comme formé de rayons parallèles, en supposant que la surface ma (*fig.* 572) soit infiniment petite. Soit ma' une autre surface, faisant un angle différent avec la direction du faisceau s. Chacune de ces deux surfaces recevant la totalité des rayons du faisceau s, l'intensité de la chaleur reçue sera, en chaque point, en raison inverse de leur étendue am, am'; on aura donc

$$i : i' = m'a : ma, \qquad \text{ou} \qquad i : i' = \sin \overline{m'ma} : \sin \overline{mm'a}.$$

Remplaçant ces *sinus* par les *cosinus* de leurs compléments, c'est-à-dire, des angles faits avec la normale, on aura enfin

$$i : i' = \cos_{san} : \cos_{san'}.$$

Remarquons qu'il ne s'agit ici que des quantités de chaleur *reçues*, et non des quantités absorbées par la surface, car celles-ci varient avec l'inclinaison des rayons (768).

776. III. Intensité de la chaleur émise obliquement. — *L'intensité de la chaleur, émise obliquement par une surface dépourvue de pouvoir réflecteur, est proportionnelle au cosinus de l'angle que font les rayons avec la normale à la surface.* Ce principe a été posé par Lambert, dans sa *pyrométrie*, comme s'appliquant à toute espèce de surface. Leslie l'a démontré, dans le cas du noir de fumée, par l'expérience suivante. On place, en face d'un miroir sphérique (*fig.* 573), un vase *ac* rempli d'eau bouillante et présentant une surface plane recouverte de noir de fumée.

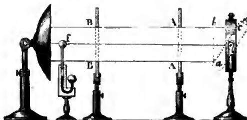


Fig. 573.

Des écrans percés de deux ouvertures égales AA, BB, limitent le faisceau que reçoit le miroir, et sont assez éloignés l'un de l'autre pour que ces rayons puissent être regardés comme parallèles entre eux. L'expérience montre que l'effet produit reste le même, quelle que soit la position que l'on donne à la surface rayonnante, pourvu que le cylindre ABAB la rencontre par tout son contour, dans toutes les positions qu'on lui donne. Or, puisque la surface rayonnante est tantôt égale à *ab*, tantôt égale à *ac*, il faut, l'effet produit restant le même, que les intensités i et i' des rayons émis par les surfaces *ac* et *ab* soient en raison inverse de ces surfaces. On a donc

$$i : i' = ab : ac = \sin acb : \sin cba.$$

Or, les angles *acb* et *cba* sont formés par les surfaces *ac* et *ab*, avec les directions des rayons émis ; les intensités i et i' sont donc proportionnelles aux *sinus* des angles que font les rayons avec la surface rayonnante, ou aux *cosinus* des angles qu'ils font avec la normale à la surface.

Fourier a rendu compte de cette loi, de la manière suivante : soit *mn* (*fig.* 574) un élément de la surface d'un corps ; du centre de cet élément décrivons une sphère ayant pour rayon la profondeur à partir de laquelle se fait l'émission des rayons (754). Si nous considérons des cylindres *amn*, *bmn*, *cmn* pris dans différentes directions, s'appuyant sur l'élément *mn* et terminés à cette surface sphérique, chacun des rayons envoyé dans la direction de ces cylindres aura la même intensité, mais

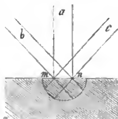


Fig. 574.

le nombre de rayons lancés dans chaque direction est proportionnel à la section droite de chaque cylindre, c'est-à-dire au *sinus* de l'angle que fait la direction du cylindre avec la surface *mn*; car chaque section droite n'est autre chose que la projection de l'élément *mn* sur un plan perpendiculaire aux arêtes du cylindre. Ce raisonnement suppose qu'il n'y a pas de réflexion intérieure, comme cela a lieu pour le noir de fumée.

Il résulte de ce principe qu'une surface courbe envoie la même quantité de chaleur dans une direction donnée, qu'une surface plane égale à sa projection sur un plan perpendiculaire à cette direction. L'expérience vérifie ce résultat : on prend un vase en forme de demi-sphère ou de demi-cylindre, recouvert de noir de fumée, et l'on reconnaît que la surface courbe tournée du côté d'un thermoscope, produit le même effet que la surface plane.

Remarquons encore que si les rayons ne perdaient pas de leur intensité quand ils s'inclinent sur la surface, comme ceux qui partent des différents points de l'élément *mn* se rapprochent les uns des autres à mesure qu'ils s'éloignent de la normale, la chaleur lancée obliquement serait extrêmement intense par rapport à celle qui serait lancée dans la direction normale, et, dans une même enceinte, la température d'un corps dépendrait à un haut degré de la position qu'il occuperait; ce qui n'a pas lieu, comme nous allons le voir.

777. Cas des corps doués de pouvoir réflecteur. — La loi de Lambert, vérifiée seulement pour le cas d'une surface sans pouvoir réflecteur, avait été généralisée et considérée comme vraie pour toutes les substances. MM. de la Provostaye et P. Desains, après avoir constaté les variations du pouvoir réflecteur avec l'incidence (761), ont remarqué que la chaleur émise n'étant que la différence entre celle qui se présente à la surface de sortie, et celle qui est réfléchie en dedans, il est naturel de penser que cette dernière varie avec l'inclinaison, comme dans la réflexion extérieure, de sorte que la portion qui sort doit aussi varier avec la direction, et ils ont entrepris une série d'expériences pour vérifier cette conséquence[1]. L'appareil qu'ils ont employé consistait en une caisse rectangulaire en cuivre, remplie d'huile portée à une température comprise entre 120° et 180°, et que l'on pouvait incliner plus ou moins. Des écrans percés délimitaient un faisceau cylindrique de rayons qui allait frapper la base d'une pile thermo-électrique.

Dans le tableau suivant sont réunis les résultats d'un grand nombre d'expériences. Les trois dernières substances étaient appliquées à l'essence de térébenthine. La lame de verre était appuyée aussi exactement que possible sur la face plane du vase. On voit que la loi de Lambert est confirmée dans le cas du noir de fumée, mais qu'elle n'est plus applicable aux autres substances, qui réfléchissent une partie de la chaleur incidente.

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XXII, p. 393.

INCLINAISON.	NOIR DE FUMÉE déposé à la lampe.	VERRE.	CÉRUSE.	OCRE rouge.	NOIR.
0°	100	90,0	100	100	100
60	»	83,6	94,6	»	»
70	100	75,01	83,9	91,2	»
75	»	65,3	»	»	»
80	100	55,44	65,9	82,3	76

778. Quantité de chaleur qui passe par les différents points d'une enceinte. — Les principes qui précèdent une fois posés, nous allons examiner d'aprés Fourier [1], les conséquences qui en découlent. Nous allons faire voir d'abord que la quantité de chaleur qui passe par un point pris dans une enceinte vide, dont toutes les parties possèdent une température constante, est la même, quelle que soit la position de ce point.

Cas d'une enceinte sans pouvoir réflecteur. — Supposons que les parois soient partout à la même température, et considérons un point quelconque m (*fig.* 575); ce point recevra des rayons calorifiques de toutes les parties de l'enceinte. Soit ac un élément infiniment petit, et I l'intensité des rayons émis par cet élément dans la direction normale, c'est-à-dire la quantité de chaleur lancée à l'unité de distance par l'unité de surface, et dépendant de sa température. L'intensité de la chaleur, partie de l'élément ac, que recevra le point m, sera $\frac{\mathrm{I}\,.\,ac \sin\alpha}{r^2}$, en désignant par r la distance du point m à l'élément ab, et par α l'angle moyen que font les rayons qui passent par le point m avec la surface de cet élément. Or, $ac \sin\alpha$ n'est autre chose que la projection ac' de l'élément ac; et, de plus, si l'on décrit une sphère du point m comme centre avec un rayon mo égal à l'unité, on a $oo' = \frac{ac'}{r^2}$. L'expression ci-dessus devient donc $\mathrm{I}\,.\,oo'$; elle représente la quantité de chaleur lancée au point m par l'élément ac.

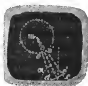


Fig. 575.

On peut arriver au même résultat par un raisonnement synthétique : les rayons émis par l'élément ab produisent le même effet que ceux qui partiraient de sa projection ac' supposée à la même température (776), et celle-ci produit le même effet qne les rayons émanant de la surface oo' comprise dans le même cône amc (774).

[1] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. VI, p. 259.

Il résulte de là, que la quantité de chaleur qui vient de toutes les parties de l'enceinte et passe par le point m, est la même que celle qui lui serait envoyée par la surface d'une sphère décrite de ce point avec un rayon égal à l'unité, et ayant la même température que l'enceinte. Le résultat est donc indépendant de la position du point m, ainsi que de l'étendue et de la forme de l'enceinte.

Si les différentes parties de l'enceinte dénuée de pouvoir réflecteur, possèdent des températures constantes différentes, on aura, pour la quantité de chaleur qui passe par le point m, $i\alpha + i'\beta + i''\gamma...$, en désignant par i, i' i'' les intensités des rayons émis normalement par les différentes portions de l'enceinte, et par α, β, γ... les parties de la sphère mo interceptées par des cônes qui, ayant leur sommet au point m, envelopperaient les parties de l'enceinte qui lancent des rayons d'intensité i, i', i''... Ces quantités α, β, γ sont appelées par Fourier la *capacité* du cône qui correspond à chaque partie de l'enceinte. On voit que, dans ce cas, la quantité de chaleur qui passe par le point m dépend de sa position; plus il est rapproché de la partie la plus chaude de la paroi, plus il reçoit de chaleur, puisque la capacité du cône qui correspond à cette portion plus chaude devient alors plus grande.

Si l'on place dans l'enceinte un écran ee' (*fig.* 576), dénué de pouvoir réflecteur et possédant la même température que la partie rr' de l'enceinte, dont il intercepte les rayons, sa présence ne changera rien à la température du point m, car l'écran substituera ses propres rayons à ceux de la portion rr'. Ce qui peut se voir encore en remarquant que les choses se passent comme si l'enceinte avait la forme $ree'r'$ au lieu de rr', et nous venons de voir que les résultats sont indépendants de sa forme. Mais si l'écran possède une température plus élevée que rr', les rayons qu'il enverra au point m seront plus intenses que ceux qu'il intercepte, et la température du point m montera. Si, au contraire, l'écran est plus froid que rr' les rayons de chaleur substitués à ceux de rr' étant moins intenses, la température du point m baissera. C'est de ce résultat, mal interprété qu'on avait d'abord conclu l'existence de rayons frigorifiques.

779. Cas où il y a des réflecteurs parfaits. — Supposons maintenant que l'écran ee' ait un pouvoir réfléchissant absolu, c'est-à-dire qu'il n'ait ni pouvoir émissif, ni pouvoir absorbant; il réfléchira vers le point m la chaleur qu'il recevra d'une certaine partie TT de l'enceinte, et sa présence aura pour effet de substituer à la chaleur envoyée par la partie rr', celle qui vient de TT ; ce qui revient à attribuer à la partie rr' cachée par ee', la température de la partie TT. Si l'enceinte est partout à la même température, on voit que la présence du réflecteur ne change pas la quantité de chaleur qui passe par le point m ; de sorte qu'une molécule placée en ce point prendrait toujours la température de l'enceinte.

Ce qui précède s'applique au cas où la surface ee', douée d'une réflexibilité absolue, ferait partie de la surface même de l'enceinte.

Supposons maintenant que, indépendamment de l'écran ee', il y ait un miroir sphérique nn' (*fig.* 576), et que le point m soit placé au foyer conjugué du corps ee', supposé à la température uniforme de l'enceinte et dénué de pouvoir réflecteur. Les rayons de rr', interceptés par ee' sont remplacés par le cône de rayons eme' qu'envoie directement ce corps. Ceux qui venaient de ss' et que le miroir nn' intercepte sont remplacés par les rayons réfléchis sur ce miroir provenant de la partie OO de l'enceinte, moins ceux qu'arrête le corps ee'. Mais ces derniers sont remplacés par ceux qui, partis de ee' se réunissent en m après s'être réfléchis sur le miroir nn' ; le point m reçoit donc encore la même quantité de chaleur. Si le corps ee' possède une température plus élevée que celle de l'enceinte, les rayons venant de ce corps, et reçus par le point m après réflexion étant plus intenses que ceux de l'enceinte qu'ils remplacent, la quantité de chaleur qui passe en m est augmentée. Si, au contraire, le corps ee' est plus froid que l'enceinte, le point m reçoit moins de chaleur. Si donc on plaçait en m un thermomètre à la température de l'enceinte, il recevrait des rayons moins intenses que ceux qu'il rayonne directement vers le corps ee' et vers le miroir nn', et il baisserait. Ce phénomène, que l'expérience vérifie, semble prouver au premier abord que le froid se réfléchit comme la chaleur ; mais nous voyons que cette opinion, soutenue principalement par Rumfort, doit être encore rejetée, et que le résultat s'explique tout naturellement par les échanges de chaleur.

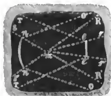


Fig. 576.

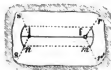


Fig. 577.

Réflexion apparente du froid. — L'expérience se fait ordinairement avec les deux miroirs conjugués (*fig.* 577) : au foyer de l'un, on place un vase rempli d'un *mélange réfrigérant*, formé, par exemple, avec de la glace pilée et du sel ordinaire ; à l'autre, on place la boule d'un thermomètre différentiel, et l'on voit aussitôt l'index se rapprocher de cette boule. Dans ce cas, les rayons provenant de la partie ss de l'enceinte et interceptés par le miroir n sont remplacés par ceux qui, partis du corps froid, tombent sur le miroir m, s'y réfléchissent, vont rencontrer le miroir n, et sont enfin concentrés sur le thermomètre. En échange, ce dernier envoie au corps f des rayons plus intenses, d'où résulte l'abaissement de température observé.

Les choses se passent comme pour la lumière : si l'on met un corps noir en f, il se forme une tache *obscure* sur un écran placé au foyer de n, et cependant on ne peut dire que l'*obscurité* se réfléchit.

L'expérience de la réflexion apparente du froid avait été faite par les académiciens de Florence, mais ils ne l'avaient pas interprétée ; elle fut répétée par Gretner et par Pictet, puis expliquée par Prevost au moyen de son ingénieuse théorie.

780. Cas de surfaces douées de réflexibilité. — Nous avons supposé jusqu'à présent que nous avions affaire à des surfaces dépourvues de réflexibilité, ou douées d'une réflexibilité absolue. Il nous reste à examiner le cas de la réalité, c'est-à-dire à supposer que les différents éléments de la surface de l'enceinte et des corps qu'elle contient absorbent une partie de la chaleur et réfléchissent l'autre. Nous pouvons ramener ce cas général aux deux cas particuliers que nous avons examinés, en considérant chaque élément de surface comme composé de deux parties, l'une douée d'un pouvoir réflecteur absolu, et l'autre dénuée de réflexibilité. Le rapport entre ces deux parties dépend de la nature de la surface. Chaque élément absorbe donc une partie de la chaleur qu'il reçoit pour la rayonner ensuite, et réfléchit l'autre, de manière que la totalité de la chaleur renvoyée est la même que si tout l'élément était doué d'un pouvoir réflecteur absolu, ou doué de la faculté d'absorber, et par conséquent d'émettre, toute la chaleur qu'il reçoit.

Si donc l'élément qui reçoit la chaleur en réfléchit une partie, ce qu'il rayonne est égal à ce qu'il a absorbé, et s'ajoute à ce qui est réfléchi pour former un total égal à la quantité de chaleur reçue. La quantité de chaleur réfléchie dépend de l'angle d'incidence (761); celle qui est émise obliquement en dépend de même, et autrement que ne l'indique la loi de Lambert (777), et il y a toujours, dans l'état d'équilibre, autant de chaleur rayonnée que de chaleur absorbée. Cela suppose aussi que le pouvoir absorbant est égal au pouvoir émissif. Or, cette condition est remplie, du moins tant que les rayons de chaleur émis et incidents ne sont pas de nature différente. Quand les rayons ne sont pas tous de même espèce, le problème devient très compliqué; l'expérience montre cependant que l'équilibre de température finit par s'établir. On peut se rendre compte de ce résultat, en remarquant que les échanges rapides qui se font entre tous les rayons d'une enceinte de température uniforme doivent ramener, dans un temps inappréciable, tous les rayons d'espèces différentes à être identiques, et les lois qui précèdent doivent rester telles que Prevost les avait établies.

Nous observerons enfin que la présence de l'air ou de tout autre gaz pourrait modifier les résultats, si la température n'était pas partout la même; à cause des mouvements, provoqués par les différences de densité, qui transporteraient la chaleur d'un endroit dans un autre.

§ 6. — LOIS GÉNÉRALES DU REFROIDISSEMENT.

781. On nomme *vitesse de refroidissement* d'un corps, l'abaissement de température de ce corps pendant une minute, temps assez court pour qu'on puisse regarder la perte de chaleur comme se faisant uniformément. Cette perte est due à deux causes, le rayonnement et le contact du milieu ambiant.

De la loi de Newton. — Newton avait admis, comme nous l'avons déjà vu (748), que la vitesse du refroidissement est proportionnelle à l'excès de la température du corps sur celle du milieu ambiant. Il résulte de cette loi que les abaissements de température pendant des temps égaux successifs, forment une progression géométrique décroissante. En effet, soit t l'excès de température à un moment donné; pendant une minute, l'abaissement de température sera nt, n étant une constante qui dépend, entr'autres, de la nature du milieu ambiant et du pouvoir émissif du corps. L'excès, à la fin de la première minute, ne sera donc plus que $t-nt=t(1-n)$. Pendant la seconde minute, l'abaissement sera $n.t(1-n)$; de sorte que l'excès ne sera plus que de $t(1-n)-nt(1-n)=t(1-n)^2$. L'abaissement de température pendant la troisième minute sera $n.t(1-n)^2$, et l'excès restant, $t(1-n)^2-nt(1-n)^2=t(1-n)^3$... et ainsi de suite; de manière que l'excès après la m^e minute sera

[1] $T=t(1-n)^m$, d'où $\log T = \log t + m \log (1-n)$.

Pour vérifier cette loi par l'expérience, on peut employer, pour le corps qui se refroidit, la boule même du thermomètre qui indique les températures. En retranchant des températures observées de minute en minute celle de l'air ambiant, on a les excès successifs, et l'on trouve qu'ils forment une progression géométrique décroissante, dont la raison $(1-n)$ est donnée par les deux premiers excès observés; car la formule [1] donne, en faisant $m=1$, $T=t(1-n)$; d'où l'on tire $(1-n)=T:t$. Par ce moyen on a pu constater que la loi de Newton est vraie entre certaines limites (748). Parmi ceux qui se sont livrés à ces expériences de vérification, il faut citer Kraft, Richmann, qui a aussi donné son nom à cette loi, Rumfort et M. Biot. Martine, dès 1740, avait signalé l'inexactitude de la loi de Newton pour les grands excès de température, et Erxleben reconnut que les écarts sont d'autant plus prononcés que les excès sont plus grands, ce que Dalton a confirmé depuis. Enfin, Delaroche est arrivé au même résultat, dans le cas du refroidissement dû au rayonnement seul. La question en était là, quand Dulong et Petit ont publié sur ce sujet de savantes recherches qui sont un modèle pour les physiciens [1], et que nous allons exposer.

782. RECHERCHES PRÉLIMINAIRES. — Pour n'avoir pas à se préoccuper de la difficulté plus ou moins grande que la chaleur éprouve à se déplacer dans l'intérieur des corps pour se rendre à leur surface, Dulong et Petit ont opéré sur des masses liquides, dans lesquelles il s'établit des mouvements qui en mêlent toutes les parties, de manière à rendre la température uniforme. Le thermomètre à mercure lui-même constituait le corps qui se refroidissait.

Méthode de calcul. — Pour calculer, au moyen des résultats donnés par des observations faites de minute en minute, la vitesse de refroidissement

[1] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. VII, p. 225 et 337.

correspondante à un excès de température quelconque, Dulong et Petit ont employé la méthode suivante. Considérons les excès de température A, B, C, D..... T observés après 0^{min}, 1^m, 2^m, 3^m,..... t^m. Si la loi de Newton était exacte, on aurait (781)

$$B = Am, \quad C = Bm = Am^2, \quad D = Am^3 \ldots\ldots \; T = Am^t,$$

m étant une constante qui dépend de la nature du corps. Il n'en est pas ainsi exactement, surtout si les excès A, B, C... sont élevés. Mais on conçoit qu'on pourra toujours représenter un certain nombre de ces excès, par une expression de la forme $T = Am^{(\alpha t + \beta t^2)}$, en déterminant les constantes m, α, β au moyen de trois observations directes assez rapprochées pour que la loi exprimée par cette formule puisse être considérée comme vraie entre ces limites ; et les excès T compris entre ceux que l'on a observés, ou s'en écartant peu en deçà et au-delà, seront donnés par cette relation. En calculant m, α, β au moyen de trois autres observations directes assez rapprochées, on aura une nouvelle formule qui servira à calculer les excès compris entre ceux qui auront servi à calculer les nouvelles constantes, et ainsi de suite. Ces formules dont on fait souvent usage en physique, se nomment des *formules d'interpolation* ou *formules empyriques* ; elles ont l'avantage de permettre de calculer des résultats compris entre certaines limites, au moyen d'un petit nombre de valeurs mesurées directement, et de les dégager des incertitudes et des irrégularités que présentent toujours les résultats bruts des observations.

Evaluation de la vitesse. — L'équation $T = Am^{\alpha t + \beta t^2}$ peut être considérée comme représentant une courbe rapportée à deux axes rectangulaires *ox*, *oy* (*fig.* 578), et dont les abcisses représentent les valeurs de *t*, et les ordonnées, celles de T. Construisons d'abord les trois points n, *n' n"* qui correspondent aux trois couples de valeur de T et *t*, qui ont servi à calculer les constantes m, α, β, et joignons ces trois points par une courbe aussi régulière que possible. Cette courbe représentera l'équation dont il s'agit. A chaque valeur de m, α, β correspondra ainsi un arc de courbe, au moyen duquel on pourra trouver la valeur de *t* correspondant à un excès T donné, en cherchant sur la courbe le point qui correspond à cet excès T, et mesurant l'abcisse correspondante *t*.

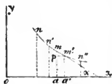


Fig. 578.

Pour obtenir la vitesse de refroidissement qui correspond à un excès donné, observons qu'on peut la définir : le rapport entre un abaissement infiniment petit de température et le temps infiniment petit pendant lequel il s'effectue. Soit donc *aa'* (*fig.* 578) une durée infiniment petite, et *mp* la diminution de température correspondante ; la vitesse sera $\frac{mp}{aa'} = \frac{mp}{pm'}$. Or, dans le triangle *mm'p*, on a

$\frac{mp}{pm'} = \text{tang}\, \overline{mm'p} = \text{tang}\, \alpha$; en remarquant que l'élément infiniment petit mm' prolongé, donne la tangente à la courbe, et en appelant α l'angle que fait cette tangente avec l'axe des abcisses. On voit donc que la vitesse du refroidissement correspondant à un excés de température $T = \overline{am}$ (*fig.* 578) est représentée par la tangente trigonométrique de l'angle que fait avec l'axe des x, la tangente à la courbe au point m. La vitesse ainsi évaluée est toujours un peu trop grande, parce que l'élément mm' ne peut être infiniment petit pendant la durée du temps aa', quelque petite qu'elle soit, de sorte que la tangente au point m ne se confond pas rigoureusement avec cet élément; mais l'erreur est négligeable quand on prend le temps aa' suffisamment petit [1].

783. De l'influence de la masse du liquide, de sa nature, etc. — La méthode de calcul une fois adoptée, Dulong et Petit ont commencé par chercher si la masse du liquide qui se refroidit, sa nature, la forme du réservoir qui le contient et la nature de sa surface, ont une influence sur les lois cherchées. Pour cela, ils ont d'abord fait refroidir dans l'air trois thermomètres ayant des réservoirs dont les diamètres étaient de 2^{cm}, 4^{cm} et 7^{cm}. Ils ont reconnu que les vitesses de refroidissement de ces instruments n'étaient pas égales pour les mêmes excès, mais qu'il y avait toujours le même rapport entre les vitesses données par deux d'entre eux; de sorte que l'on pouvait passer de la série des vitesses données par un des thermomètres à celle de l'un des deux autres, en multipliant tous les termes de la première série par un même nombre. Les lois sont donc les mêmes pour les trois instruments; seulement les valeurs absolues des vitesses soumises à ces lois varient de l'un à l'autre.

Des thermomètres égaux plongés dans des vases remplis d'eau, d'alcool absolu et d'acide sulfurique; trois thermomètres de même capacité, le premier à réservoir sphérique et les deux autres à réservoir cylindrique, l'un ayant une hauteur égale au rayon de sa base, et l'autre une hauteur quadruple de ce rayon, ont servi à reconnaître, par le même moyen, que les lois ne dépendent pas de la nature du liquide ni de la forme du réservoir. En employant enfin des vases remplis d'eau, l'un en verre, l'autre en fer-blanc, il a été constaté que les lois ne sont pas les mêmes pour ces deux sortes d'enveloppes; car en prenant les rapports entre les vitesses qui correspondent aux mêmes excès de température, ces rapports ne sont pas égaux; ils augmentent à mesure que les excès de température diminuent.

[1] Ce n'est pas au moyen d'une construction graphique que Dulong et Petit évaluaient ainsi la vitesse du refroidissement, mais par le calcul : en différentiant l'équation $T = Am^{(\alpha t + \beta t^2)}$, il vient $\frac{dT}{dt} = T(\alpha + 2\beta t) \log m$, qui donne la vitesse $\frac{dT}{dt}$. La valeur de t qui correspond à T se détermine au moyen de l'équation exponentielle, de même qu'on la détermine au moyen de la courbe, dans le procédé graphique.

Cela posé, on a cherché les lois du refroidissement dû au rayonnement seul, c'est-à-dire dans le vide, puis les lois du refroidissement dû au contact d'un gaz environnant. Nous allons d'abord décrire les appareils imaginés pour opérer dans le vide ou dans un gaz donné.

784. Appareil et mode d'expérience. — Les thermomètres dont le refroidissement devait être observé étaient au nombre de deux. Le réservoir de l'un avait 6cm de diamètre, et celui de l'autre 2cm. Ce dernier servait pour les faibles excès de température, afin d'abréger la durée des expériences. On pouvait, du reste, passer des indications de l'un à celles de l'autre, en opérant avec l'un et l'autre pour quelques températures communes.

L'enceinte, dans laquelle le refroidissement avait lieu, consiste en un ballon en cuivre mince B (*fig.* 579), de 30cm de diamètre, dont le col est dressé avec

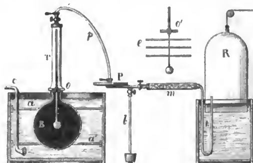


Fig. 579.

soin et placé horizontalement. Ce ballon est plongé dans une cuve remplie d'eau, jusqu'à une petite distance de son ouverture *o*, et maintenu par des traverses *a*, *a'*. Il prend la température de l'eau, que l'on fait varier soit en y jetant des fragments de glace, soit en y faisant arriver de la vapeur d'eau par le tube *c*. L'intérieur du ballon est garni de noir de fumée, de manière que toute la chaleur que lui envoie le thermomètre est absorbée; si quelque petite quantité était réfléchie, cette quantité variant sensiblement comme les pertes de chaleur du thermomètre, l'erreur qui en résulterait affecterait les résultats proportionnellement.

Sur l'orifice du ballon est appliqué un disque de verre *o*, usé à l'émeri et percé de plusieurs ouvertures, dont une au centre, dans laquelle on fixe par un bouchon la tige du thermomètre. La partie graduée de cette tige est séparée du réservoir par une partie très étroite, ayant une longueur égale au rayon du ballon, de manière à diminuer la masse du mercure qui est hors de la boule, et à empêcher des courants de ce liquide de se produire dans l'instrument. La tige graduée est enveloppée par un manchon en verre T, dont l'ouverture s'applique

sur le disque de verre o, par son bord usé à l'émeri. Ce manchon porte à sa partie supérieure un robinet auquel s'ajuste un tube de plomb p, que l'on peut mettre en communication avec une machine pneumatique, dont on voit la platine en P.

Manière d'opérer dans le vide. — Pour observer les vitesses du refroidissement dans le vide, on commence par échauffer le thermomètre jusqu'à l'ébullition du mercure, en le portant sur des charbons ardents, après l'avoir séparé de l'appareil avec le disque de verre o. Des écrans, que l'on voit en e, et qui sont placés au-dessous du disque, o', servent à le préserver de la chaleur, ainsi que la tige graduée. On replace ensuite le disque en o, on ajuste le manchon T, on fait rapidement le vide dans le ballon, et l'on prend note de l'indication donnée par le tube barométrique b de la machine pneumatique (I, 332).

Manière d'opérer dans les gaz. — Pour observer le refroidissement dans un gaz, après avoir procédé comme il vient d'être dit, on introduit le gaz dans le ballon. Ce gaz est recueilli d'avance dans un gazomètre R soutenu par un contre-poids; il passe de là, par un tube recourbé t qui s'ouvre au-dessus de l'eau du gazomètre, dans un gros tube m rempli de matières desséchantes, par exemple de chlorure de calcium en petits fragments, et de là se rend par le centre de la platine P dans le ballon B. Afin d'enlever le reste d'air que contient le ballon, on fait de nouveau le vide, puis on fait encore entrer du gaz desséché, dont la pression est déterminée au moyen du tube b ou de l'éprouvette de la machine pneumatique. Quand il s'agissait d'opérer dans l'air, on laissait simplement entrer ce gaz par l'extrémité du tube m, dans lequel il se desséchait. Les dimensions du thermomètre étaient telles que, dans le vide, on pouvait commencer les observations à 300° ; dans les gaz, on ne les commençait qu'à 250°, parce qu'il fallait attendre que le gaz eût pris la température du ballon.

Méthode d'observation. — L'appareil une fois prêt pour expérimenter dans le vide ou dans un gaz, on observait avec un cathétomètre, les températures indiquées par le thermomètre, à des intervalles de temps égaux donnés par une montre à seconde, l'eau de la cuve étant maintenue à une température constante. Puis, on divisait la série des observations en plusieurs groupes qu'on représentait chacun par des expressions de la forme $Am^{(\alpha t+\beta t^2)}$, qui servaient à calculer les vitesses de refroidissement pour les différents excès de température (782). On prenait des excès variant de 20° en 20°, et l'on opérait successivement avec un thermomètre à boule argentée et le même thermomètre à boule nue.

785. Corrections. — 1° La température observée est trop faible, parce que le mercure contenu dans la tige a bientôt pris la température ambiante, inférieure à celle de la boule. Il faut donc ajouter à la température observée, le nombre de degrés correspondant à la dilatation qu'éprouverait le mercure de la tige si on la portait, de la température de l'air ambiant à celle de la boule.

Pour faire cette correction, soit x la température réelle de la boule, T celle qui est indiquée, t celle de l'air extérieur, et t' le nombre des divisions de la tige à $t°$ occupées par le mercure. La dilatation du mercure qui occupe ces t' divisions est $t'\frac{1}{6480}$ pour 1° (699), et pour $(x-t°)$, elle est $t'(x-t)\frac{1}{6480}$. La température cherchée est donc $x=T+t'(x-t)\frac{1}{6480}$, d'où l'on tire la valeur de x. Comme T diffère peu de x, on peut remplacer x par T dans le second membre, et la correction devient $t'(T-t)\frac{1}{6480}$.

2° Les vitesses du refroidissement observées sont trop grandes, à cause du mercure froid qui pénètre dans la boule quand le mercure s'y contracte. Connaissant la quantité de mercure introduite et sa température, ainsi que la masse du mercure de la boule et sa température, on évaluait facilement le refroidissement occasionné par ce mélange du mercure venu de la tige.

3° Toutes les températures ont été ramenées au thermomètre à air, c'est-à-dire remplacées par celles qu'eût données un thermomètre à air placé dans les mêmes conditions. Nous verrons, en traitant de la dilatation des gaz, comment se fait la transformation.

786. REFROIDISSEMENT DANS LE VIDE. — Les vitesses du refroidissement dans le vide sont affectées d'une petite erreur provenant d'un peu d'air qui reste dans le ballon. On a corrigé les vitesses déduites du calcul, en en retranchant la quantité correspondante à la chaleur enlevée par l'air resté dans le ballon. Cette quantité se calcule, comme nous le verrons, en se servant de la vitesse dans le vide, laquelle est entachée de la petite erreur dont il s'agit; mais comme la correction est très faible, l'influence de cette erreur est, ici, tout à fait insensible.

Les premières expériences ont été faites sur le thermomètre à boule nue. Après avoir formé la série des vitesses de refroidissement pour des excès de température variant de 20° en 20°, on les compare, pour trouver la loi. Une première remarque montre que la température absolue de l'enceinte doit avoir de l'influence sur le refroidissement, pour un même excès. En effet, soit θ cette température, et $t+\theta$ celle du corps qui rayonne dans le vide. $F(t+\theta)$ et $F(\theta)$ représenteront le rayonnement du corps et celui de l'enceinte, F désignant une fonction inconnue de la température absolue, qui représente la loi du rayonnement. On peut alors, d'après la théorie de l'équilibre mobile de température, admettre que la vitesse de refroidissement est représentée par la formule

$$V=F(t+\theta)-F(\theta).$$

Si la loi de Newton était vraie, les fonctions F seraient proportionnelles à leur variable, et égales, l'une à $m(t+\theta)$, l'autre à $m\theta$, et la vitesse du refroidissement serait mt; elle serait donc indépendante de la température de l'enceinte. Mais, cette loi n'étant pas exacte, il a fallu chercher celle qui lie les vitesses aux températures absolues de l'enceinte.

I. Loi relative à la température de l'enceinte. — L'enceinte étant portée successivement à 0°, 20°, 40°, on a remarqué d'abord que, *pour un même excès de température du thermomètre*, le refroidissement est plus rapide quand l'enceinte est à une température plus élevée. Ayant alors pris le rapport entre les vitesses correspondantes aux mêmes excès, quand l'enceinte était successivement à 0° et à 20°, puis à 20° et 40°, puis à 40° et 60°, enfin à 60° et 80°, on a trouvé toujours sensiblement le même rapport. Ce rapport était égal à 1,165, dans les expériences de Dulong et Petit, quel que fût l'excès considéré. On en doit conclure que :

1° *La température absolue de l'enceinte ne change pas la loi relative à l'excès de température.*

2° *Les vitesses du refroidissement dans le vide, pour un excès constant de température, croissent en progression géométrique quand les températures de l'enceinte croissent en progression arithmétique ; et la raison de la progression géométrique est la même, quel que soit l'excès de température considéré.*

787. II. Loi relative aux excès de température. — Cette première loi peut servir à trouver celle dont dépendent les excès de température ; elle montre que la vitesse du refroidissement est représentée par

$$[2] \qquad V = F(t+\theta) - F(\theta) = \varphi(t)\, a^{\theta};$$

car si l'excès t est constant, on voit que V varie en progression géométrique quand θ varie en progression arithmétique. a est une constante, et $\varphi(t)$ une fonction de t qu'il faut trouver. Nous suivrons pour cela la marche indiquée par Blanchet, comme étant plus élémentaire que celle qu'ont suivie Dulong et Petit.

Faisons d'abord $\theta = 0$ dans l'équation [2] ; elle devient $F(t) - F(o) = \varphi(t)$. Faisons maintenant successivement $t = \theta + t$ et $t = \theta$; il vient

$$F(\theta + t) - F(o) = \varphi(\theta + t), \qquad F(\theta) - F(o) = \varphi(o).$$

En retranchant ces deux équations membre à membre, il vient

$$F(\theta + t) - F(\theta) = \varphi(\theta + t) - \varphi(\theta).$$

Or, le premier membre n'est autre chose que celui de l'équation [2] ; on a donc

$$\varphi(\theta + t) - \varphi(\theta) = \varphi(t) a^{\theta}, \qquad \text{ou} \qquad \varphi(\theta + t) = \varphi(\theta) + \varphi(t) a^{\theta}.$$

Faisons θ égal successivement à t, $2t$, $3t$..... $(n-1)t$; nous aurons

$$\varphi(2t) = \varphi(t) + \varphi(t)\, a^{t} = \varphi(t)\,(a^{t} + 1),$$

$$\varphi(3t) = \varphi(2t) + \varphi(t)\, a^{2t} = \varphi(t)\,(a^{2t} + a^{t} + 1).$$

. . . .

. . . .

$$\varphi(nt) = \varphi((n-1)t) + \varphi(t) a^{(n-1)t} = \varphi(t)\left(a^{(n-1)t} + a^{(n-2)t} + \ldots + a^{t} + 1\right).$$

Dans la dernière équation, la quantité entre parenthèses est la somme des termes d'une progression géométrique dont la raison est a^t. Remplaçant cette somme par sa valeur, il vient

$$\varphi(nt) = \varphi(t)\,\frac{a^{nt}-1}{a^t-1}, \qquad \text{ou} \qquad \frac{\varphi(nt)}{a^{nt}-1} = \frac{\varphi(t)}{a^t-1}.$$

On voit donc que le rapport de la quantité $\varphi(nt)$ à la quantité $a^{nt}-1$ est constant, quel que soit nt, puisque les deux membres ne diffèrent qu'en ce que t est représenté par nt. Représentons ce rapport par m, nous aurons

$$m = \frac{\varphi(t)}{a^t-1}, \qquad \text{d'où} \qquad \varphi(t) = m\,(a^t-1).$$

Substituant dans l'équation [2], il vient enfin, pour la vitesse du refroidissement,

$$[3] \qquad V = ma^\theta\,(a^t-1),$$

expression qui renferme les lois du refroidissement dans le vide. Si l'on suppose constante la température θ de l'enceinte, na^θ sera constant, et l'on voit que :

Les vitesses du refroidissement d'un corps dans une enceinte vide entretenue à une température constante, croissent en progression géométrique dont les termes sont diminués d'une quantité constante (ma^θ), quand les excès de température, t, forment une progression arithmétique croissante.

La raison a de cette progression peut se calculer, dans le cas du thermomètre dont on a fait usage ; car on a trouvé $a^{20} = 1{,}165$ (786) ; donc

$$a = \sqrt[20]{1{,}165} = 1{,}0077.$$

La constante m se calcule au moyen d'une valeur de V correspondant à des valeurs données de θ et de t ; elle s'est trouvée égale à 2,037.

Dulong et Petit ont ensuite vérifié la formule [3], en comparant les valeurs qu'elle donne pour V, avec celles que fournit directement l'expérience. L'accord s'est toujours trouvé aussi satisfaisant que possible, dans une étendue de 300° de l'échelle centigrade. Cette vérification était nécessaire, à cause de ce qu'il peut y avoir d'hypothétique dans la manière de représenter la vitesse de refroidissement par la formule $V = F(t+\theta) - F(\theta)$.

Expériences sur le thermomètre argenté. — Ayant calculé les vitesses de refroidissement du thermomètre à boule argentée, ainsi que celles du thermomètre à boule nue pour les mêmes températures de l'enceinte et les mêmes excès, Dulong et Petit ont trouvé entre elles toujours le même rapport. La formule [3] s'applique donc aussi au thermomètre argenté, en conservant la constante a, mais en modifiant la valeur de m, qui devient égale à 0,357.

La grande différence de nature de l'argent et du verre a conduit Dulong et Petit à regarder les lois exprimées par la formule [3] comme s'appliquant à tous les corps.

788. Conséquences. — Si nous faisons $\theta = -\infty$, c'est-à-dire si nous supposons que le thermomètre se refroidit dans un espace vide et sans chaleur, la formule [3] devient $V = ma^T$, en appelant T la température $t+\theta$. Ce qui montre que *les vitesses de refroidissement d'un corps, dans une enceinte vide ne pouvant lui envoyer de chaleur, décroitraient en progression géométrique quand les températures diminueraient en progression arithmétique*; et le rapport de cette progression géométrique serait le même pour tous les corps. Cette loi est celle du *rayonnement particulaire*. On peut conclure de là que les pouvoirs rayonnants des différentes substances conservent les mêmes rapports à toutes les températures [1].

Pour rendre le rayonnement nul, il faut faire $T = -\infty$, ce qui fixe à l'infini le *zéro absolu*, et conduit à regarder comme infinie la quantité de chaleur que contient un corps. Mais cela supposerait qu'à chaque degré de température correspond la même quantité de chaleur, et nous verrons, en traitant des chaleurs spécifiques, que, au contraire, cette quantité diminue quand la température s'abaisse. Or, il peut se faire que la loi de cette diminution soit telle que la somme des quantités de chaleur correspondant à chaque degré ait une valeur finie.

Cette loi du rayonnement particulaire peut nous ramener à celle qui est exprimée par la formule [3]. En effet, pour obtenir le refroidissement d'un corps dans une enceinte vide qui rayonne, il suffit de retrancher de ma^T la quantité ma^θ que rayonne l'enceinte, et il vient

$$V = m(a^T - a^\theta) = ma^\theta(a^t - 1), \qquad \text{en faisant} \quad T = t + \theta.$$

Egalité des pouvoirs émissif et absorbant. — Il résulte de la formule [3] que $ma^{t+\theta}$ représente la chaleur émise par un corps dans le vide, et ma^θ, celle qu'il reçoit de l'enceinte, ou celle qu'il absorbe. ma^θ représente donc le pouvoir absorbant. Or, comme cette expression représente aussi la quantité de chaleur rayonnée ou le pouvoir émissif, quand la température est θ, nous voyons que ce pouvoir est égal au pouvoir absorbant, et cette égalité est démontrée ici jusqu'à 300°. Nous pouvons donc dire que :

Les vitesses de refroidissement ou de réchauffement (par conséquent le pouvoir émissif et le pouvoir absorbant) décroissent en progression géométrique, quand les températures diminuent en progression arithmétique, et la raison de la première progression est la même pour tous les corps.

[1] Ce rapport a été trouvé égal à 5,707 entre le verre et l'argent, ce qui donne 6,33 pour le pouvoir émissif de ce dernier par rapport au noir de fumée représenté par 100. Ce nombre est beaucoup trop fort (751), ce qui doit être attribué aux incertitudes de la méthode du refroidissement, pour les évaluations de cette nature.

Rappelons enfin que toutes les lois qui précèdent supposent les températures évaluées au moyen du thermomètre à air (785).

789. Refroidissement dans les gaz. — Pour obtenir la vitesse de refroidissement due à la présence d'un gaz remplissant le ballon B (*fig.* 579), il suffit de retrancher, des vitesses totales observées, calculées au moyen de la formule [3], les vitesses qui auraient lieu dans le vide sous les mêmes conditions.

Le premier point établi par Dulong et Petit, en employant un thermomètre nu, puis un thermomètre argenté, c'est que *la nature de la surface n'a pas d'influence sur les pertes de chaleur dues au contact du gaz.* Ce résultat a été obtenu avec l'air et le gaz hydrogène. Leslie l'avait déjà conclu indirectement d'expériences faites sur l'air en mouvement (750).

Effet de la température de l'enceinte. — Pour faire varier la température de l'enceinte et celle du gaz, on échauffe plus ou moins l'eau qui entoure le ballon B (*fig.* 579), et l'on a soin de laisser le gaz se dilater librement pendant qu'il s'échauffe. Dulong et Petit ont alors trouvé qu'un gaz enlève toujours la même quantité de chaleur pour un même excès, quelle que soit sa température. Les expériences ont été faites sur l'*air*, l'*hydrogène*, l'*acide carbonique* et le *gaz oléfiant*. De là cette loi générale :

La vitesse de refroidissement dû au contact seul d'un gaz dépend, pour un même excès de température, de la densité et de la température du fluide ; mais cette dépendance est telle que la vitesse reste la même, si la densité et la température du gaz changent de manière que l'élasticité reste constante.

On peut donc n'avoir égard qu'à l'élasticité des gaz.

Loi relative à la pression. — Cela posé, on a mesuré les vitesses de refroidissement *dans l'air*, sous les pressions de 72^{cm}, 36^{cm}, 18^{cm}, 9^{cm}, c'est-à-dire sous des pressions qui sont entre elles comme les nombres $1, \frac{1}{2}, \frac{1}{4}, \frac{1}{10}$. En prenant les rapports entre les vitesses sous deux pressions consécutives pour les divers excès, on a trouvé le même nombre constant 1,366, quels que fussent l'excès de température et les deux pressions consécutives, considérées. Ce résultat vérifié aussi sur l'hydrogène, l'acide carbonique et le gaz oléfiant, conduit aux lois suivantes :

1° *La loi, suivant laquelle la vitesse de refroidissement par le contact d'un gaz varie avec les excès de température, reste la même, quelle que soit l'élasticité de ce gaz.*

2° *L'élasticité du gaz variant en progression géométrique, son pouvoir refroidissant varie aussi en progression géométrique.* Le rapport de la première progression étant 2, celui de la seconde est, en moyenne, 1,366 pour l'*air*, 1,301 pour l'*hydrogène*, 1,431 pour l'*acide carbonique*, et 1,415 pour le *gaz oléfiant*.

Ce résultat peut être énoncé plus simplement : soit P le pouvoir refroidissant de l'air sous la pression p. Ce pouvoir devient P (1,366), sous la pression $2p$; $P(1,366)^2$, sous la pression $4p$...; $P(1,366)^n$ sous

la pression $2^n p$. Posons $2^n p = p'$ et $P(1,366)^n = P'$; on aura, en éliminant n après avoir pris les logarithmes,

$$\frac{\log P' - \log P}{\log(1,366)} = \frac{\log p' - \log p}{\log 2}, \quad \text{d'où} \quad \frac{P'}{P} = \left(\frac{p}{p'}\right)^{0,45},$$

en remontant aux nombres. Pour l'hydrogène, l'exposant serait 0,38; pour l'acide carbonique, 0,517, et pour le gaz oléfiant, 0,501. On voit donc que *le pouvoir refroidissant d'un gaz est, toutes choses égales d'ailleurs, proportionnel à une certaine puissance de son élasticité*; puissance dont l'exposant varie d'un gaz à l'autre.

Loi relative aux excès de température. — La pression et la température de l'enceinte restant constantes, on a reconnu d'abord que la loi relative aux excès de température est la même pour les quatre gaz observés. En effet, le rapport entre les pouvoirs refroidissants des deux gaz est toujours le même, quel que soit l'excès considéré. Nous avons déjà vu que cette loi est aussi, indépendante de l'élasticité d'un même gaz.

Après un grand nombre d'essais, Dulong et Petit ont trouvé la loi suivante: *Les vitesses de refroidissement dues au contact seul d'un gaz, croissent en progression géométrique quand les excès de température du corps croissent aussi en progression géométrique.* Le rapport de la dernière progression étant 2, celui de la première est 2,35. En employant la méthode de calcul développée ci-dessus à propos de la loi des pressions, on arrive à l'énoncé suivant: *Le pouvoir refroidissant d'un gaz est proportionnel à la puissance 1,233 de l'excès de température.*

790. Expression générale de la vitesse de refroidissement due à un gaz. — Nous avons vu que l'excès de température t et la pression p sont les seuls éléments à considérer, et que le pouvoir refroidissant est proportionnel à une certaine puissance de l'élasticité, et à la puissance 1,233 de l'excès de température (789); on a donc

$$V = np^c t^b,$$

b étant, pour tous les gaz et pour tous les corps, égal à 1,233; c étant aussi le même pour tous les corps, mais variant d'un gaz à un autre; et la valeur de n changeant avec la nature du gaz et les dimensions du corps.

Pouvoir refroidissant des gaz. — La formule qui précède donne le moyen de comparer les pouvoirs refroidissants des différents gaz. Ces pouvoirs doivent varier avec la pression, mais d'une quantité négligeable dans les limites de variations de la pression atmosphérique. Le pouvoir refroidissant de l'air étant pris pour unité sous la pression de $0^m,76$, celui de l'hydrogène est 3,45; celui de l'acide carbonique 0,965. Si l'on veut comparer le refroidissement dû au gaz, à celui que produit le rayonnement, on trouve que l'air enlève

au thermomètre nu un peu moins de chaleur que le rayonnement, et 5 ou 6 fois au plus, au thermomètre argenté. L'hydrogène enlève au thermomètre nu au moins 3 fois autant de chaleur qu'il en perd par le rayonnement, et 10 à 12 fois autant, au thermomètre argenté. Ce grand pouvoir refroidissant de l'hydrogène est dû principalement à sa grande mobilité, occasionnée elle-même par sa faible densité; mais il est dû aussi au pouvoir conducteur relativement très grand de ce gaz, comme nous le verrons bientôt (822).

La loi qui vient de nous occuper n'a été établie que jusqu'à 250°; il était utile de la vérifier pour des températures plus élevées. Dulong et Petit ont employé pour cela la méthode suivante, dont l'idée est due à Leslie : soient v et v' les vitesses de refroidissement, dues au contact de l'air et au rayonnement, pour le thermomètre à boule nue; v sera le même pour le thermomètre argenté (789), mais v' sera remplacé par $\frac{v'}{5,707}$, puisque le rapport des pouvoirs émissifs du verre et de l'argent est 5,707 (788). On aura donc, en appelant a et b les vitesses totales de refroidissement des deux thermomètres,

$$a = v + v', \quad \text{et} \quad b = v + \frac{v'}{5,707}; \quad \text{d'où} \quad v = \frac{5,707\, b - a}{5,707}, \qquad [4]$$

en éliminant v'. On aura ainsi le pouvoir refroidissant de l'air seul, en observant le refroidissement total, b et a, des deux thermomètres dans l'air. On a trouvé par cette méthode des résultats d'accord avec ceux que donne la formule $v = n't^b$, dans laquelle n' varie avec la pression. On a pu ainsi pousser la vérification jusqu'à 360° [1]. Quand on se sert de la formule [4], on suppose que le rapport 5,707 entre les pouvoirs émissifs du verre et de l'argent reste le même à toute température, et le calcul sert en même temps à vérifier *à posteriori* cette supposition. La formule [4] sert aussi à vérifier que la quantité de chaleur enlevée par l'air ne dépend pas de la nature de la surface rayonnante.

Pouvoir refroidissant d'un gaz en mouvement. — Quand le gaz qui entoure le corps qui se refroidit est en mouvement, le refroidissement qu'il occasionne est plus rapide. Le mouvement produit le même effet que si la surface du corps était augmentée; de sorte que les pouvoirs refroidissants des différents gaz animés de la même vitesse, conservent les mêmes rapports que dans l'état de repos. Comme le rayonnement est toujours le même, la chaleur enlevée par le gaz, quand il est animé d'une grande vitesse, forme la presque totalité de la perte éprouvée par le corps, et alors la surface n'a plus d'influence sensible, l'effet constant dû au rayonnement étant très petit par rapport à celui que produit le gaz.

[1] L'accord aurait été encore plus satisfaisant si le rapport 5,707 n'eût pas été trop fort (788).

791. Loi générale du refroidissement. — La vitesse totale de refroidissement U d'un corps dans un gaz, s'obtient en réunissant la vitesse due au rayonnement, exprimée par la formule $V = ma^{\theta}(a^{t} - 1)$, à celle qui est due au gaz, donnée par l'expression $np^{c}t^{b}$; on aura donc

$$U = ma^{\theta}(a^{t} - 1) + np^{c}t^{b},$$

formule dans laquelle a est toujours égal à 1,0077; c est le même pour tous les corps, mais change d'un gaz à l'autre; b est constant pour tous les gaz et égal à 1,233; m et n augmentent l'un et l'autre avec l'étendue de la surface qui se refroidit, m variant seul avec la nature de cette surface, et n dépendant de la nature du gaz. Il est facile de concevoir maintenant pourquoi la loi des vitesses de refroidissement dans l'air change avec la nature de la surface (783), car m varie avec la surface, tandis que n n'en dépend pas. La formule générale que nous venons de poser a été vérifiée par Dulong et Petit, et depuis par plusieurs physiciens, au moyen de nombreuses expériences. On voit combien cette formule est compliquée, et ce n'est qu'en séparant les effets dus au rayonnement et au contact du gaz qu'on pouvait espérer de la découvrir.

792. Remarque. — Les lois de Dulong et Petit ne doivent être considérées que comme des lois empyriques, vraies dans les circonstances où ils ont opéré, mais devant recevoir quelques modifications quand on opère dans d'autres conditions. Remarquons d'abord qu'il est difficile d'admettre que la forme du corps qui se refroidit n'a en général aucune influence sur la quantité de chaleur que lui enlève un gaz. En effet, c'est principalement par des courants provoqués par la dilatation des portions qui enveloppent le corps, que le gaz lui enlève sa chaleur. Or, on conçoit que, si le corps était allongé dans le sens vertical, l'air qui le toucherait ne lui enlèverait pas autant de chaleur que s'il était disposé horizontalement; car, en s'élevant, il le préserverait du contact de l'air froid. Aussi, un thermomètre à long réservoir se refroidit-il plus vite quand il est horizontal que lorsqu'il est vertical. Nous allons voir aussi que la nature de la surface, la forme et même les dimensions de l'enceinte ont une influence marquée sur la vitesse de refroidissement.

A l'époque des expériences de Dulong et Petit on ne connaissait pas la thermochrôse. Or, si le corps qui se refroidit était à une température très élevée, les rayons qu'il émettrait seraient d'une autre nature que ceux que lui renverrait l'enceinte qui est beaucoup plus froide, et les échanges de chaleur ne se feraient pas de la même manière que lorsque le corps est au-dessous de 160°. Les lois ne peuvent donc pas être aussi générales qu'on l'avait cru d'abord. Une expérience curieuse de MM. de la Provostaye et P. Desains met bien en évidence l'influence de la thermochrôse des rayons. On place sous le récipient de la machine pneumatique un thermomètre différentiel dont les boules, très rapprochées, sont séparées par un petit écran. L'une des boules est dorée, et l'autre couverte de blanc de céruse. Si l'on projette sur les deux

boules les rayons d'une forte lampe, on reconnaît, au déplacement de l'index, que la boule blanche s'échauffe plus vite que la boule dorée quand le récipient est plein d'air ; mais que le contraire a lieu quand on a fait le vide. Ainsi, dans le vide, l'or, qui réfléchit 0,96 de la chaleur incidente, s'échauffe plus vite que le blanc de céruse dont le pouvoir émissif est égal à celui du noir de fumée, au moins jusqu'à 150°. Ce phénomène provient de ce que, si le blanc absorbe dans le même temps environ 5 fois plus de chaleur que l'or, il émet 25 fois plus de chaleur obscure ; de sorte que, dans le vide, le rapport des vitesses de refroidissement des deux boules serait celui de 25 à 1. Dans l'air, il n'est plus que 1,64, et alors la différence d'absorption n'est plus compensée.

793. Expériences de MM. de la Provostaye et P. Desains [1]. — MM. de la Provostaye et P. Desains font remarquer d'abord que la formule donnée par Dulong et Petit n'a pas toute la généralité désirable, car elle suppose que le pouvoir émissif de l'enceinte est absolu, et que sa grandeur n'a pas d'influence; enfin, elle n'a été établie que dans le cas du refroidissement, et l'on ne peut être certain qu'elle soit applicable au cas du réchauffement. L'appareil employé dans les nouvelles recherches que nous allons faire connaître, consiste en un ballon de cuivre, noirci en dedans (*fig.* 580), et composé de deux parties; la partie supérieure, soudée à l'étain suivant *ab*, porte un tube à robinet destiné à y faire varier la pression. Le thermomètre est ajusté, au moyen d'un bouchon, dans une tubulure *te*, qui s'enfonce à frottement doux dans le col du ballon, et porte un rebord, plan en dessous, qui s'applique exactement sur un rebord semblable qui termine le col du ballon. Un collier articulé, à vis, *o*, sert à presser l'une contre l'autre les deux surfaces planes, entre lesquelles est interposé en *cf* un anneau de cuir. Enfin, une plaque fendue, adaptée en *e* au bas de la virole, sert à compléter l'enceinte sphérique quand le thermomètre est en place.

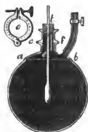


Fig. 580.

Le thermomètre était échauffé dans un moufle, pour éviter l'altération de sa surface par le contact des charbons. Des écrans servaient à abriter la partie supérieure de sa tige, ainsi que la tubulure *te* ; on l'ajustait rapidement au ballon, on serrait l'anneau *o* et l'on établissait la pression sous laquelle on voulait opérer. On dressait ensuite le tableau des excès de température et des instants correspondants [2]. Pour en déduire les vitesses de refroidissement, on

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XVI, p. 337.

[2] Indépendamment des corrections relatives à la température plus basse de la tige et à la rentrée du mercure froid, il y a à remarquer que la masse de mercure contenue dans le réservoir va en augmentant et que sa chaleur spécifique diminue avec la température. Ces deux causes d'erreur agissent en sens contraire et doivent se compenser en partie.

se servait de la formule connue $T = a\left(\frac{1}{\mu}\right)^t$ (782), par laquelle on liait un certain nombre d'excès, en admettant que la loi de Newton était exacte dans une petite étendue, et l'on calculait les vitesses pour des excès compris entre ceux qui avaient servi à déterminer la constante μ.

794. Refroidissement dû aux gaz. — Influence de la surface. — Pour reconnaître si le pouvoir refroidissant d'un gaz dépend de la nature de la surface du corps qui se refroidit, on a observé le refroidissement d'un même thermomètre, sous deux pressions très différentes; puis, retranchant l'une de l'autre les vitesses correspondantes à un même excès de température, on a cherché si les différences restaient les mêmes quand le réservoir était nu ou argenté. L'expérience a prouvé que les restes sont en général plus grands pour le thermomètre argenté ; d'où il faut conclure que l'action refroidissante de l'air dépend de la surface, puisque le refroidissement par rayonnement reste le même dans les deux quantités que l'on retranche.

Cela posé, il était nécessaire de vérifier si la loi du refroidissement produit par les gaz reste la même quand on emploie différentes surfaces. MM. de la Provostaye et P. Desains ont opéré avec des thermomètres nus, argentés, dorés et noircis ; et ils ont reconnu, en partant de la formule $P = np^c t^{1,233}$ (790), que le pouvoir refroidissant d'un gaz est bien proportionnel à la puissance 1,233 de l'excès de température, et à la puissance c de la pression, par exemple, à la puissance 0,45 quand il s'agit de l'air. Voici la méthode employée pour vérifier le premier point : on mesure les vitesses sous deux pressions différentes p, p', pour un même excès de température; on prend la différence de ces vitesses, et l'on a $D = nt^b(p^c - p'^c)$, en posant $b = 1,233$. On répète l'expérience sous les mêmes pressions et pour un autre excès, et l'on a la différence $D' = nt'^b(p^c - p'^c)$. Divisant ces différences l'une par l'autre, il vient

$$\frac{D}{D'} = \left(\frac{t}{t'}\right)^b, \quad \text{et} \quad \log\frac{D}{D'} = b\log\frac{t}{t'}; \quad \text{d'où} \quad \log\frac{D}{D'} : \log\frac{t}{t'} = b,$$

et l'on reconnaît que la loi est vraie, puisque, en divisant ainsi le logarithme du rapport des différences par le logarithme du rapport des excès, on trouve un résultat constant égal à 1,233.

Pour vérifier la constance de l'exposant c, on prend trois vitesses totales, sous trois pressions p, p', p'', et pour un même excès de température. On retranche de la première pression, successivement les deux autres, ce qui donne les différences $nt^b(p^c - p'^c)$, $nt^b(p^c - p''^c)$; en les divisant l'une par l'autre, on a le rapport $\frac{p^c - p'^c}{p^c - p''^c}$, indépendant de l'excès de température. L'expérience montre qu'il en est ainsi dans l'air, en prenant $c = 0,45$,

excepté pour des pressions très faibles, inférieures à 6 ou 7 millimètres. Dans ce cas, le temps du refroidissement d'un même nombre de degrés est le même ponr les pressions de $2^{mm},8$ et de 6^{mm}. Ce résultat se voit sur la courbe *ss* (*fig.* 581), dont les abcisses représentent les pressions, et les ordonnées, les vitesses de refroidissement. La formule de Dulong et Petit ne s'applique donc plus au cas des très faibles pressions. La valeur de la constante n s'obtient en égalant l'expression $n\,(p^{0,45} - p'^{0,45})\,t^{1,233}$ à la différence des vitesses mesurée directement dans l'air. On a alors une équation d'où l'on tire la valeur de n. En prenant les moyennes d'un grand nombre de résultats obtenus par ce moyen, on a trouvé $n = 0,0003224$ pour le thermomètre argenté, et $n = 0,0003118$ pour le thermomètre à surface vitrée. La différence entre ces nombres confirme l'influence de l'état de la surface sur le pouvoir refroidissant de l'air.

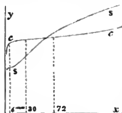


Fig. 581.

795. Refroidissement dû au rayonnement seul. — Pour obtenir le refroidissement dans le vide, on retranche de la vitesse totale, celle qui est due à l'air, calculée par la formule vérifiée $P = np^c t^b$. MM. de la Provostaye et Desains ont trouvé que la formule $V = ma^{\theta}(a^t - 1)$ s'applique exactement quand on emploie un thermomètre à surface vitreuse ou noircie. Mais pour un thermomètre doré ou argenté, la valeur de m que l'on regarde comme proportionnelle au pouvoir émissif, varie, et à peu près proportionnellement à la température; de sorte qu'il semble que *le pouvoir rayonnant augmente avec la température*, pour les surfaces métalliques. Dans toutes ces expériences, on a eu soin de dorer ou argenter la partie de la tige qui se trouvait dans le ballon; sans cela le pouvoir émissif du verre étant très grand par rapport à celui des métaux, le refroidissement rapide de la tige aurait apporté des erreurs considérables dans les résultats.

796. Influence des dimensions de l'enceinte. — Après avoir vérifié, comme il vient d'être dit, les formules de Dulong et Petit, MM. de la Provostaye et P. Desains se sont livrés à de nombreuses expériences pour reconnaître l'influence sur le refroidissement, de la grandeur, de la forme et de la nature de la surface de l'enceinte. Pour étudier d'abord l'influence de la grandeur et de la forme] de l'enceinte, ils ont employé deux ballons sphériques noircis, de 24^{cm} et de 15^{cm} de diamètre, et un vase cylindrique de 6^{cm} de diamètre et de 20^{cm} de hauteur. Dans le petit ballon, le refroidissement total dans l'air est plus rapide que dans le grand, quel que soit l'état de la surface du thermomètre, et les différences sont d'autant plus prononcées que la pression est plus faible. Au-dessus de 20^{mm}, la différence est très petite. Sous la pression de 6^{mm}, le thermomètre doré mettait, pour s'abaisser d'un certain nombre de degrés, $40^m\ 10^s,5$ dans le grand ballon, et $33^m\ 56^s$, dans le plus petit.

On peut expliquer pourquoi le refroidissement est plus rapide dans le petit ballon que dans le grand, en remarquant que le gaz en mouvement a moins de chemin à parcourir, dans le premier, pour aller perdre au contact des parois la chaleur qu'il a enlevée au thermomètre, et pour revenir ensuite près de ce dernier lui en enlever une nouvelle quantité.

Dans l'enceinte cylindrique, le refroidissement est plus grand que dans le grand ballon, depuis la pression 760mm jusqu'à 45mm environ. Le contraire avait lieu pour les pressions plus faibles. Ce résultat se voit facilement sur la *fig.* 581, dans laquelle la courbe *ss* correspond à l'enceinte sphérique, et la courbe *cc* à l'enceinte cylindrique. On voit, sur cette dernière courbe, que la vitesse est sensiblement constante depuis la pression de 15mm jusqu'à 70mm environ; tandis que, dans l'enceinte sphérique, elle varie beaucoup entre les mêmes limites de pressions. Pour vérifier ce résultat, on observait la vitesse du refroidissement dans le cylindre, sous la pression de 70mm; puis, faisant descendre la pression à 15mm, on reconnaissait que la marche du refroidissement n'était pas altérée par ce changement.

Il résulte de ce qui précède que, lorsque l'on diminue les dimensions et la forme des enceintes, la loi du refroidissement par l'air se complique, surtout pour les pressions très faibles, en admettant, ce qui est très probable d'après des expériences faites à ce sujet, que l'effet dû au rayonnement est indépendant de la grandeur des enceintes. Du reste, la vitesse du refroidissement dû à l'air semble pouvoir toujours être représentée par une expression de la forme At^c, mais l'exposant c change avec la pression. Quant au pouvoir refroidissant de l'air dans l'enceinte cylindrique, il ne peut plus être représenté par la formule $np^{0,45}t^{1,233}$, même en modifiant les exposants.

797. Nous avons vu (794) que le pouvoir refroidissant de l'air est indépendant de la pression, au-dessous de 6 à 7mm, dans un ballon de 24cm de diamètre. Cette limite semble être d'autant plus élevée que le ballon est plus petit. On a constaté un phénomène semblable dans d'autres gaz. Des expériences faites avec un thermomètre argenté, dans une enceinte cylindrique noircie, ont montré que, dans le gaz hydrogène, le temps du refroidissement augmente à peine de $\frac{1}{12}$ de sa valeur quand la pression passe de 760mm à 60mm, et d'un peu moins de $\frac{1}{12}$ quand elle passe de 60mm à 20mm. De manière qu'en passant de la pression de 760mm, c'est-à-dire à une pression 38 fois plus faible, la vitesse du refroidissement diminue dans le rapport de 7 à 6 seulement. Ce rapport serait donc de 3 à 1 pour l'air, dans la même enceinte et sous les mêmes pressions. Dans l'hydrogène, la vitesse devient moitié moindre à 4mm qu'à 20mm de pression, et la pression, et la part de ce gaz dans le refroidissement, sous cette faible pression, est encore énorme; car la vitesse totale est plus grande, dans le rapport de 4 à 3 environ, que celle qu'on observe dans l'air sous la pression de 760mm. Dans l'acide carbonique, la vitesse diminue jusqu'à ce que la pression ait atteint 35mm, puis elle reste constante jusqu'à 12mm, et sous la pression de 4mm elle est *plus grande* que sous celle

de 35^{mm}. Ce résultat inattendu, vérifié avec grand soin, se reproduit pour le protoxyde d'azote, dont la densité et la chaleur spécifique sont à peu près les mêmes que celles de l'acide carbonique ; aussi les pouvoirs refroidissants de ces deux gaz sont-ils à peu près égaux.

Pour expliquer ces résultats, on peut remarquer que le pouvoir refroidissant d'un gaz dépend de sa densité et de sa mobilité, éléments qui varient en sens inverse quand on diminue la pression, et l'on conçoit que les effets puissent tantôt se compenser, tantôt se surpasser dans un sens ou dans l'autre. Une circonstance vient à l'appui de cette manière de voir : si l'on mêle à du gaz hydrogène, sous la pression de 30^{mm}, de l'air en volume égal, de manière à amener cette pression à 60^{mm}, le pouvoir refroidissant du mélange est moindre que celui de l'hydrogène seul. Ainsi, l'air introduit diminue le pouvoir refroidissant de l'hydrogène, au lieu d'y ajouter le sien. Ce résultat peut s'expliquer en admettant que la présence de l'air diminue la mobilité du gaz, au point que l'effet provenant du changement de densité ne peut compenser l'influence de la diminution de la mobilité.

Il résulte de ce qui précède que la courbe *ss* (*fig.* 581), qui représente les vitesses totales dans l'air, présente une ou plusieurs inflexions dans les autres gaz, quand les pressions sont faibles. On voit, de plus, qu'on ne peut regarder comme négligeable l'effet d'un gaz sous une pression très petite, puisque sous la pression de 4^{mm} le pouvoir refroidissant de l'hydrogène est supérieur à celui de l'air sous la pression de 76^{cm}. Lors donc que pour corriger la vitesse observée dans le vide on en retranche l'effet produit par la petite quantité de gaz qu'on n'a pu enlever, en calculant cet effet au moyen de la formule de Dulong et Petit, on fait une correction inexacte, puisque la formule dont on se sert ne s'applique plus aux très faibles pressions, et que l'influence du gaz très raréfié peut n'être pas négligeable. De là aussi l'incertitude de la méthode par laquelle on voudrait mesurer les pouvoirs émissifs au moyen du refroidissement, et l'explication de l'inexactitude du rapport trouvé par Dulong et Petit entre les pouvoirs émissifs du verre et de l'argent (788). De plus on peut altérer un peu les valeurs des constantes *m* et *n* de la formule générale de Dulong et Petit (791) sans changer sensiblement les vitesses calculées au moyen de cette formule. Le pouvoir émissif que l'on regarde comme proportionnel à la valeur de *m*, ne peut donc pas s'obtenir avec précision par la méthode du refroidissement.

798. Influence de la surface intérieure de l'enceinte. — C'est afin de pouvoir modifier la surface intérieure du ballon, qu'on l'avait formé de deux parties soudées à l'étain suivant la ligne *ab* (*fig.* 580). Les expériences ont été faites principalement avec l'intérieur garni de noir de fumée ou argenté. Le pouvoir refroidissant d'un gaz ne paraît pas dépendre de l'état de la surface de l'enceinte. Dans le cas du thermomètre vitré, la loi du refroidissement produit par rayonnement reste la même quand l'enceinte est argentée ; seulement les pertes par rayonnement sont réduites à peu près de moitié. On pouvait facilement prévoir cette diminution, puisque la surface argentée renvoie par

réflexion au thermomètre une partie de la chaleur intense, qu'elle en reçoit. Lorsque, au contraire, il s'agit d'un thermomètre recouvert d'une feuille métallique, on trouve que son refroidissement est *indépendant* du pouvoir émissif de l'enceinte. Ce qui peut s'expliquer par le faible pouvoir absorbant de l'argent, qui rend insensible l'effet dû à la plus haute température des rayons réfléchis. Au contraire, le moindre changement dans ce pouvoir émissif influence notablement le refroidissement d'une surface vitreuse. Cette circonstance montre encore combien est peu exacte la méthode du refroidissement appliquée à la comparaison des pouvoirs émissifs.

Une autre circonstance à remarquer, c'est qu'un thermomètre argenté, puis recouvert de noir de fumée, se refroidit moins vite dans le vide que lorsque le noir de fumée a été appliqué immédiatement sur le verre. Ce fait a été vérifié directement au moyen d'un ballon de verre rempli de mercure chaud et placé en présence de la pile thermo-électrique. Ce ballon était recouvert de noir de fumée, et sur une de ses moitiés le noir était séparé du verre par une feuille d'argent. En tournant tantôt cette moitié et tantôt l'autre du côté de la pile, on voyait l'aiguille du réomètre se déplacer généralement de plus de $\frac{1}{2}$ degré, et quelquefois d'un degré entier. Ce fait jette de nouvelles incertitudes sur les déterminations des pouvoirs émissifs. Voici quelques-uns des résultats trouvés par MM. de la Provostaye et Desains par la méthode du refroidissement, pour les rapports, *m*, des pouvoirs émissifs du noir de fumée, du verre et de l'argent :

		RAPPORT DES VALEURS DE *m*.	
		à toute température.	
Thermomètre à réservoir *cylindrique*.	vitré. . . . . . / noirci.	90,9	
		à 150°	à 63°
Thermomètre à réservoir *cylindrique*.	argenté. . . . . / vitré.	13,2	17,1
		à 105°	à 48°
Thermomètre à réservoir *sphérique*.	argenté. . . . . / vitré.	17,0	19,9

On voit que, pour le thermomètre argenté, le pouvoir émissif augmente quand la température diminue, comme nous l'avons déjà dit (795).

799. Lois du réchauffement. — Les lois trouvées par Dulong et Petit avaient été regardées, par analogie, comme s'appliquant à l'échauffement des corps aussi bien qu'à leur refroidissement; mais on n'avait aucune expérience à ce sujet. La loi de Newton avait cependant été reconnue exacte dans une expérience de Rumfort faite sur l'échauffement d'un vase de laiton dans une chambre à 10° environ au-dessus de la température du vase. MM. de la Provostaye et P. Desains ont complété leur grand travail sur les lois du refroidissement,

en étudiant directement le réchauffement d'un thermomètre dans leur ballon noirci de 15^{cm} de diamètre, entretenu à une température constante par de la vapeur d'eau bouillante. Pour empêcher les corps gras qui se trouvent au point de jonction du thermomètre, d'entrer en fusion, le ballon était muni d'un long col, dont la partie supérieure était entourée d'eau froide. Comme le thermomètre s'échauffe pendant qu'on fait le vide ou qu'on dispose l'appareil, on n'a pu opérer que dans un intervalle de 40°.

On a reconnu ainsi que le réchauffement dû à l'air suit les mêmes lois que le refroidissement et est représenté par la même formule, excepté aussi pour les faibles pressions (794). Le réchauffement dans le vide suit aussi les mêmes lois que le refroidissement, et est représenté par la formule $V = ma^{\theta}(a^{t} - 1)$, qui est la même que pour le refroidissement, en changeant le signe de t. Les deux phénomènes peuvent donc être représentés par la formule

$$V = ma^{T} - ma^{T'},$$

dans laquelle T représente la température du thermomètre, et T′ celle de l'enceinte dans le cas du refroidissement; et T′ celle du thermomètre, et T celle de l'enceinte dans le cas du réchauffement.

Il est à remarquer que la valeur de m n'est pas la même dans les deux cas. Des expériences nombreuses ont prouvé qu'elle est moindre dans le cas du réchauffement, et que le corps se réchauffe moins vite dans le vide qu'il ne se refroidit, pour une même différence de température de l'enceinte. Le rapport des deux vitesses a été trouvé de 1,039 ; 1,0797 ; 2,153; quand les valeurs de t étaient de 5°, 10°, 500°. La présence de l'air ne fait que modifier les différences, et peut même les rendre plus sensibles.

800. Etat d'un thermomètre dans une enceinte dont la température n'est pas uniforme. — Proposons-nous de calculer la température finale que prendrait un thermomètre, dans une enceinte dont toutes les parties n'auraient pas la même température. Soit T la température cherchée, $\theta, \theta', \theta''$... les températures des différentes portions de l'enceinte, correspondantes à des *capacités de cône* (778) égales à α, β, γ..., quantités qui sont des fractions d'une surface sphérique ayant pour rayon l'unité. Supposons d'abord que l'enceinte soit vide et qu'il n'y ait pas de pouvoir réflecteur. La quantité absolue de chaleur rayonnée par le thermomètre sera ma^{T} (788). Celle qu'il recevra des différentes parties de l'enceinte sera $m\alpha a^{\theta} + m\beta a^{\theta'} + \ldots$ De sorte que, pour qu'il reste stationnaire, on devra avoir

$$ma^{T} = m\alpha a^{\theta} + m\beta a^{\theta'} + \ldots\ldots, \qquad \text{ou} \qquad a^{T} = \alpha a^{\theta} + \beta a^{\theta'} + \ldots\ldots,$$

équation d'où l'on tire la valeur de T.

Si le thermomètre possède un pouvoir réflecteur, m sera plus petit et devra

être remplacé par $\frac{m}{r}$. Mais comme le pouvoir absorbant est égal au pouvoir émissif, le thermomètre n'absorbera que la fraction $\frac{1}{r}$ de la chaleur émise par l'enceinte, et l'équation restera la même. Le résultat ne dépend donc pas du pouvoir émissif du thermomètre.

S'il y a de l'air dans l'enceinte, il faudra ajouter la quantité P de chaleur qu'il enlève, à celle que rayonne le thermomètre, et l'équation deviendra

$$\frac{m}{r}\,a^{T} + P = \frac{m}{r}\,(\alpha a^{\theta} + \beta a^{\theta'} + \ldots\ldots);$$

et comme P varie avec la nature de la surface du thermomètre, d'une autre manière que le pouvoir émissif, on voit que la valeur de T dépendra de ce pouvoir émissif. C'est pour cela que deux thermomètres d'égale dimension, l'un noirci et l'autre argenté, et exposés à une même source de chaleur, prennent des températures stationnaires différentes. Si l'on regarde P comme constant, ce qui a lieu quand on ne dépasse pas les limites de la loi de Newton, il en sera encore de même.

Dans le cas où la loi de Newton peut s'appliquer, on peut démontrer directement ce résultat : soit S la quantité de chaleur qu'envoie la source de chaleur aux deux thermomètres que l'on en approche à la même distance ; a et n les pouvoirs absorbants de leurs surfaces, égaux aux pouvoirs émissifs ; et t et t' les excès de température qu'ils ont sur l'air extérieur, quand ils sont devenus stationnaires. Les quantités de chaleur reçues, pendant le même temps, par les deux instruments, seront Sa et Sn, et les quantités de chaleur perdues seront, d'après la loi de Newton, $kat+ct$, et $knt'+ct'$; k étant un coefficient qui dépend de l'étendue de la surface des thermomètres et de leur masse, et ct, ct' les quantités de chaleur enlevées par l'air, proportionnelles aux excès t et t'. La quantité de chaleur reçue devant être égale, quand il y a équilibre, à celle qui est perdue, on a

$$Sa = kta + ct, \qquad Sn = kt'n + ct',$$

$$\text{d'où} \qquad \frac{a}{n} = \frac{t\,(ka+c)}{t'\,(kn+c)}, \qquad \text{et} \qquad \frac{t}{t'} = \frac{kan+ca}{kan+cn}.$$

On voit que, si n est plus grand que a, t' sera plus grand que t. Dans le vide, on aurait $c=0$ et $t=t'$.

CHAPITRE III.

CONDUCTIBILITÉ DES CORPS POUR LA CHALEUR.

§ 1. — CONDUCTIBILITÉ DES SOLIDES.

I. Conductibilité dans les solides homogènes.

801. Nous avons déjà dit (685) que la chaleur peut se propager lentement à travers les corps de molécule à molécule, et avec une vitesse très variable qui dépend de leur nature. L'existence de ce mode de propagation peut être mise en évidence par une foule d'expériences : la chaleur du feu contenue dans un poêle se fait bientôt sentir au dehors ; si l'on verse de l'eau bouillante dans un vase, sa surface extérieure devient brûlante ; une barre de fer s'échauffe à l'une de ses extrémités quand l'autre plonge dans un foyer, malgré la précaution que l'on prend de placer un écran qui empêche la chaleur du foyer de rayonner vers cette barre. Cette propriété est connue sous le nom de *conductibilité*, *conductibilité* ou *pouvoir conducteur*. Les différentes substances ne conduisent pas également la chaleur ; les anciens en avaient fait la remarque, et l'on doit à Aristote quelques expériences sur ce sujet. C'est surtout sur la conductibilité dans les corps solides qu'ont porté les travaux des physiciens et des mathématiciens. Voyons d'abord comment on explique la communication de la chaleur dans l'intérieur d'une substance homogène.

802. Explication de la conductibilité. — Supposons un corps dont on échauffe une partie. Les molécules échauffées vont rayonner de tous côtés et lancer de la chaleur à celles, plus froides, qui les avoisinent. Celles-ci, échauffées au moyen de la partie de cette chaleur qu'elles absorbent, la rayonnent vers celles qui viennent ensuite, lesquelles s'échauffent à leur tour ; et ainsi de suite de proche en proche. Ce mode de propagation est une conséquence du principe du *rayonnement particulaire* (755). La vitesse avec laquelle une molécule perd sa chaleur pour la céder aux molécules voisines, dépend de l'excès de sa température sur celle de ces dernières. Si donc T et t sont les températures de deux molécules voisines M et m, la molécule m recevra de M une quantité de

chaleur égale à $kF(T-t)$, k étant une constante qui dépend de la distance **Mm** et de la nature des molécules. Si le corps n'était pas homogène, la distance **Mm** varierait avec la direction de la ligne *Mm*, et la quantité de chaleur qui passerait dans différentes directions ne serait pas la même. Nous verrons plus loin que l'expérience confirme cette prévision de la théorie.

Fourier, qui a traité par l'analyse la question de la conductibilité, a admis que la loi de Newton s'applique aux molécules, très rapprochées, dont la différence de température ne peut être qu'excessivement petite ; de sorte que la quantité de chaleur envoyée d'une molécule à une autre est $k(T-t)$. A l'époque où écrivait Fourier, Dulong et Petit n'avaient pas encore prouvé que la vitesse du refroidissement dépend de la température absolue du corps qui se refroidit. Cependant, les lois trouvées par Fourier ont été vérifiées par l'expérience, ce qui peut être regardé comme une preuve *à posteriori* de l'exactitude de son point de départ. On a donc continué d'admettre que la loi de Newton s'applique toujours aux molécules voisines, quelle que soit leur température absolue. Du reste, cette supposition n'implique pas contradiction avec les lois trouvées par Dulong et Petit, l'état relatif de deux molécules n'étant en aucune manière comparable à celui de deux corps de dimensions finies, rayonnant l'un vers l'autre.

803. Comparaison des pouvoirs conducteurs des solides. — Le passage de la chaleur d'un point à l'autre d'un corps dépend, d'après ce qui précède, de sa densité, et de la masse ainsi que de la nature de ses molécules. Le pouvoir conducteur varie donc d'un corps à un autre. Quand on ne veut que comparer les pouvoirs conducteurs des substances solides, on se sert de la méthode suivante, imaginée par Ingenhousz et par Franklin. On donne aux substances dont on veut comparer les conductibilités, la forme de petits cylindres de même diamètre que l'on implante par une extrémité dans une lame de bois. On les trempe ensuite dans de la cire fondue, de manière qu'en les retirant ils restent couverts d'une couche mince de cette substance. Quand les cylindres sont refroidis, on en plonge l'extrémité dans de l'huile chaude ; la chaleur se propage à travers leur substance et la cire est fondue, au bout d'un certain temps, partout où la température atteint au moins 55°. Plus est grande la longueur sur laquelle la cire est fondue, plus la conductibilité de la barre est prononcée.

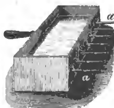


Fig. 581.

Comme l'air dilaté au contact de l'huile s'élève et apporte de la chaleur aux parties supérieures des cylindres, Gay-Lussac les a implantés horizontalement dans la paroi d'une caisse en métal (*fig.* 581), dont elles traversent l'épaisseur. On verse de l'eau bouillante dans cette caisse, et l'on trouve au bout d'un certain temps la cire

fondue, jusqu'à une distance d'autant plus grande de la caisse, que le pouvoir conducteur est plus prononcé. Ce petit appareil est connu sous le nom d'*appareil d'Ingenhousz.*

Thermomètre de contact. — La méthode que nous venons de mentionner ne convient qu'aux substances susceptibles de recevoir la forme de baguettes. Pour celles qui ne sont pas dans ce cas, comme les étoffes, les matières filamenteuses, on emploie le *thermomètre de contact* de Fourier. Ce petit instrument consiste en un thermomètre *t* (*fig.* 582), ajusté au col d'un vase conique *a*, fermé en-dessous par une membrane mince, et rempli de mercure. La lame dont on veut apprécier le pouvoir conducteur est posée sur une table entretenue à une température élevée et constante ; par exemple sur une caisse en métal, dans laquelle on fait passer un courant de vapeur. On applique le thermomètre sur cette lame, la chaleur la traverse, se communique au mercure et de là au thermomètre, qui, perdant une quantité de chaleur proportionnelle à l'excès de sa température sur celle de l'air, finit par devenir stationnaire. Il reçoit alors autant de chaleur qu'il en perd ; on peut donc dire que la quantité de chaleur qui passe dans un temps donné à travers la lame interposée, est aussi proportionnelle à l'excès de la température du thermomètre sur celle de l'air. On pourra donc, en opérant sur divers corps d'égale épaisseur et assez étendus pour dépasser notablement la base du vase *a*, comparer les pouvoirs conducteurs de ces corps.

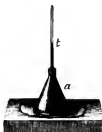


Fig. 582.

Fourier opérait d'abord autrement : il chauffait le thermomètre de contact et l'appuyait sur la lame posée sur une table maintenue à la température de l'air ambiant, et il mesurait la vitesse de refroidissement de l'instrument, laquelle dépendait entr'autres de la chaleur qu'il cédait à la table, chaleur qui devait traverser la lame à essayer ; mais cette manière d'opérer, exigeant l'emploi d'une formule assez compliquée, est beaucoup moins commode que celle qui précède.

Résultats. — On a reconnu par ces divers moyens que les corps qui conduisent le mieux la chaleur sont généralement les plus denses, par conséquent les métaux ; et parmi les métaux les plus denses et les moins fusibles, comme l'or et le platine. Le plomb et l'étain, qui sont très fusibles, sont moins bons conducteurs. Après les métaux viennent les substances pierreuses, le marbre, les briques. Le verre est mauvais conducteur ; on peut tenir un tube de verre, sans se brûler, très près du point où il est en fusion. Le soufre, les résines sont aussi de très mauvais conducteurs. Les bois desséchés sont dans le même cas ; les plus denses conduisent mieux que les autres. Le charbon conduit assez bien *quand il a été calciné*, autrement il est mauvais conducteur.

Les substances textiles sont de mauvais conducteurs de la chaleur; elles sont placées dans l'ordre suivant : *soie*, *laine*, *coton*, *lin*, *chanvre*, la soie conduisant le moins. On peut se rendre compte de la relation qui existe entre la conductibilité et la densité, en observant que, dans les corps les plus denses, il y a généralement plus de molécules dans un espace donné, et par suite plus de points matériels par lesquels la chaleur peut se propager de proche en proche. La nature des molécules a, du reste, aussi son influence; par exemple, le plomb est moins bon conducteur que le fer et que le zinc, qui ont une densité moindre; mais aussi il est plus fusible.

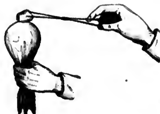


Fig. 583.

Le grand pouvoir conducteur des métaux peut être mis en évidence par une expérience très simple : on applique une fine toile sur une masse de métal poli (*fig.* 583), de manière que le contact soit bien établi, et l'on pose sur le tout un charbon ardent dont on augmente l'incandescence au moyen d'un courant d'air. La toile ne brûle pas, parce que la chaleur qu'elle reçoit lui est aussitôt enlevée par le métal qu'elle touche, et rapidement disséminée dans sa masse; la température du tissu ne peut alors s'élever assez pour qu'il se carbonise.

C'est par un effet semblable que les métaux nous paraissent très froids pendant l'hiver, quoiqu'à la même température que d'autres corps qui ne produisent pas la même impression, comme le bois, les étoffes; la chaleur enlevée à la main ne reste pas au point touché, mais se répand dans la masse conductrice, de manière qu'une nouvelle quantité est aussitôt soustraite. De même un métal chaud produit une impression de chaleur que ne produit pas un corps mauvais conducteur de même température. L'état des surfaces peut modifier ces différences d'impression, le nombre des points en contact avec la main, variant suivant que le corps est plus ou moins bien poli.

Les méthodes que nous avons citées ne donnent pas en nombres, les rapports des pouvoirs conducteurs des corps. La proportionnalité des conductibilités aux excès, indiquée par le thermomètre de contact, n'est pas exacte, parce que la loi de Newton n'est qu'approchée, et que la quantité de chaleur qui passe par les parties de la lame qui sont près de celles que recouvre l'instrument, a de l'influence sur la proportion de chaleur qui passe dans ce dernier. Pour comparer numériquement les conductibilités des différentes substances, on considère principalement les deux cas les plus simples de la propagation dans les corps, savoir, le passage à travers un mur indéfini dont les faces sont entretenues à des températures constantes, et la propagation dans une barre chauffée à l'une de ses extrémités.

804. Lois des températures dans un mur. — Considérons un mur indéfini AA′ B′B (*fig.* 584) dont les deux faces sont entretenues à des températures constantes a et b, et supposons $a > b$. Si la température du mur est d'abord partout égale à b, la chaleur de la face A se transmettra à la couche voisine; celle-ci échauffera de même la couche suivante, et ainsi de suite jusqu'à la face BB′, où la chaleur sera enlevée par la cause qui empêche la température b de varier. Au bout d'un temps plus ou moins long, chaque tranche possédera une température constante, et quand il en sera ainsi elle recevra autant de chaleur qu'elle en cédera à la tranche suivante, laquelle cédera aussi ce qu'elle aura reçu; de manière que la quantité de chaleur qui traversera chacune des tranches, pendant un temps donné, sera la même pour toutes. Nous allons démontrer que cette condition est satisfaite quand *les températures des couches successives forment une progression arithmétique.*

Fig. 584.

Fig. 585.

Représentons par AA′ et Bt (*fig.* 584) les températures a et b. Si nous joignons les points A et t par une ligne droite, d'après la loi énoncée, la température d'une tranche mn serait représentée par l'ordonnée nm. Cette température sera donc $mn = \overline{AA'} - \overline{Ao} = a - \overline{Ao}$. En comparant les triangles semblables Aom, A$t't$, on trouve $\overline{Ao} = \overline{At'}\,\frac{om}{tt'} = (a-b)\frac{z}{e}$, en représentant par e l'épaisseur du mur, et par z la distance om du plan mn à la face la plus chaude AA′. On a donc

$$\overline{mn} = a - (a-b)\,\frac{z}{e}. \qquad [1]$$

Pour montrer que la quantité de chaleur qui traverse une tranche est indépendante de sa position, considérons deux plans L, L (*fig.* 585), et deux couples de molécules n, m et n', m' placées deux à deux très près l'une de l'autre, et de la même manière de part et d'autre de chacun de ces plans. Soient T, t et T′, t' les températures de ces molécules, et ζ la différence des valeurs de z dans chaque couple. En retranchant l'une de l'autre les valeurs de T et t données par la formule [1], on trouve $T - t = \frac{a-b}{e}\zeta$. On a de même $T' - t' = \frac{a-b}{e}\zeta$; d'où l'on conclut $T - t = T' - t'$; relation qui exprime, d'après la loi de Newton, que les quantités de chaleur qui traversent les tranches L, L sont égales.

805. Coefficient de conductibilité. — Supposons que les deux tranches que nous venons de considérer appartiennent à deux murs distincts de même substance. Soient e', a', b' l'épaisseur et les températures des faces du second mur. Nous aurons $T-t=\frac{a-b}{e}\zeta$, et $T'-t'=\frac{a'-b'}{e'}\zeta$. Soient q et q' les quantités de chaleur qui traversent les deux tranches pendant l'unité de temps, nous aurons aussi $q:q'=T-t:T'-t'=\frac{a-b}{e}:\frac{a'-b'}{e'}$. Supposons que l'on ait $a'-b'=1$ et $e'=1$, et soit k la valeur que prend alors q'; il vient $q=k\frac{a-b}{e}$, expression qui servira à calculer q, quand la constante k sera connue. Cette constante, qui dépend de la nature de la substance du mur, se nomme *coefficient de conductibilité*. On appelle donc ainsi *la quantité de chaleur qui passe dans l'unité de temps par l'unité de surface, à travers un mur solide ayant une épaisseur égale à l'unité, et dont les deux faces sont entretenues à des températures constantes qui diffèrent de* 1°.

Coefficient de conductibilité extérieure. — Si nous supposons que la face BB′ du mur ne soit plus entretenue à une température constante, elle finira par prendre une certaine température stationnaire b, et perdra alors autant de chaleur qu'elle en recevra des tranches qui la précèdent. Si nous désignons par h la quantité de chaleur perdue pendant une minute par l'unité de surface, quand la différence de température avec le milieu ambiant est égale à 1°, nous aurons ce que Fourier nomme *coefficient de conductibilité extérieure*. Cette quantité diffère du pouvoir émissif, puisque la chaleur est enlevée à la surface BB′ par le contact du milieu contigu, aussi bien que par le rayonnement; elle dépend aussi de la rapidité avec laquelle la chaleur arrive en dedans à la face BB′, c'est-à-dire de la *conductibilité intérieure* de la substance du mur.

Si nous supposons que l'excès de la température b de la face du mur sur la température θ du milieu qui la touche, soit assez petite pour qu'on puisse appliquer la loi de Newton, la quantité de chaleur perdue pendant une minute par l'unité de surface sera $h(b-\theta)$; h étant le *coefficient de conductibilité extérieure*. Cette quantité est égale à celle qui passe pendant le même temps par l'unité de surface d'une tranche quelconque; on aura donc $k\frac{a-b}{e}=h(b-\theta)$; relation qui fera connaître h quand le coefficient de conductibilité intérieure k sera connu.

806. Expériences de vérification. — Mesure de k. — La formule $q=k\frac{a-b}{e}$ montre que la quantité de chaleur qui traverse une tranche d'un mur est proportionnelle à la différence de température de ses faces, et est en raison inverse de son épaisseur. Cette formule a été trouvée en partant de l'hypothèse du rayonnement particulaire, et en lui appliquant la loi de

Newton (802). Il était donc nécessaire de la vérifier par l'expérience. Une fois vérifiée, elle pourra servir à calculer le coefficient k, en partant de la valeur de q mesurée par l'expérience. Un procédé, proposé par Dulong, consisterait à former avec la substance un vase sphérique, d'épaisseur uniforme assez petite pour qu'on puisse négliger la différence détendue entre les surfaces intérieure et extérieure. Ce vase serait entretenu en dedans à la température de 100° par un courant de vapeur, et en dehors à la température 0°, au moyen de glace fondante. La chaleur passant de dedans en dehors fondrait, pendant l'unité de temps, un certain poids p de cette glace. La quantité de chaleur qui aurait traversé les parois du vase serait alors lp, l étant un nombre qui représente la quantité de chaleur nécessaire pour fondre l'unité de poids de glace. Par l'unité de surface, il aurait passé seulement $lp : s$; en désignant par s la surface du vase; on aurait donc $q = lp : s = 100k : e$; d'où l'on conclurait la valeur de k.

M. Peclet a fait de nombreuses expériences sur ce sujet[1]; il a d'abord constaté que la méthode qui précède présente de grandes difficultés dans la pratique, à cause d'une couche d'eau stagnante qui adhère à la surface chauffée par la vapeur; de sorte que la température de cette surface n'est pas égale à celle de la vapeur. De plus, cette couche, quoique très mince, forme un mauvais conducteur, auprès duquel les variations d'épaisseur des lames métalliques deviennent insensibles. Ce n'était donc qu'en agitant vivement les liquides qui baignent les deux faces de la lame, que l'on pouvait espérer d'obtenir des résultats exacts. Après de nombreux essais, M. Peclet s'est arrêté à la disposition suivante : deux vases cylindriques en fer-blanc (*fig.* 586) sont placés l'un dans l'autre, et l'intervalle o, o qui les sépare est rempli de coton cardé, substance qui ne laisse passer la chaleur que très difficilement. Le vase intérieur, rempli d'eau, est soutenu par des tiges de verre u, u; il est rétréci à sa partie inférieure, et fermé par la plaque sur laquelle on veut expérimenter. On voit, dans la *fig.* 587, le mode d'ajustement de cette plaque PP. Elle est maintenue à une petite distance du bord inférieur du vase, par de petites tiges soudées sur le contour de cette plaque et s'enfonçant dans un anneau en liége oo qui sépare les deux vases; du mastic de vitrier recouvre le contour de la plaque et le dessous de l'anneau de liége. Dans l'axe du vase intérieur (*fig.* 586) est disposé un tube de cuivre pouvant tourner

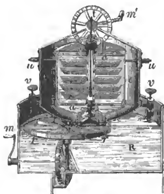


Fig. 586.

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. II, p. 107.

sur lui-même dans des colliers que portent les traverses *a*, *a* ; le mouvement lui est imprimé par le moyen d'une roue dentée *m'* qui commande un pignon denté fixé à sa partie supérieure. Ce tube est armé de palettes obliques, destinées à produire une vive agitation, et à sa partie inférieure sont des bandes de toile de crin, destinées à balayer la surface de la plaque pour renouveler continuellement la couche d'eau qui la recouvre. Un thermomètre *t* fixé à un arc *c* adapté au couvercle du vase intérieur, occupe l'axe du tube de cuivre. Le système des deux vases est soutenu par des vis *v*, *v*, au-dessus d'un réservoir rempli d'eau R, de manière que la plaque s'enfonce dans le liquide, de 1 à 2mm. Une roue horizontale *rr*, mise en mouvement au moyen de la manivelle *m* et d'une roue dentée, frotte continuellement, de ses rayons formés de tresses tendues, la partie inférieure de la plaque. Par ce moyen, on peut renouveler jusqu'à 1600 fois par minute le liquide en contact avec les faces de la plaque.

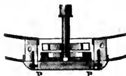


Fig. 587.

Dans ses premières expériences, M. Peclet faisait arriver, au moyen d'un tube évasé, un courant de vapeur d'eau au-dessous de la plaque PP (*fig.* 587); puis, quand la température de l'eau placée au-dessus avait atteint 25°, il mesurait le temps employé pour échauffer cette eau, de 5° en 5°. Si l'on admet que les quantités de chaleur qui traversent la plaque pendant un temps très court sont proportionnelles aux différences de température des deux surfaces, l'accroissement de température qui serait produit pendant 1s, si la différence de température était de 1°, sera donné par la formule

$$a = \frac{m}{t} (\log A - \log T),$$

dans laquelle A et T sont les excès de température de la vapeur, sur celle de l'eau au commencement et à la fin du temps *t*, et *m* le module des tables de logarithmes. On calcule *a* au moyen des valeurs de A et T; et si la loi supposée est vraie, on doit toujours trouver la même valeur pour *a*, quelles que soient les valeurs A et T. C'est ce que M. Peclet a reconnu par l'expérience, sur des plaques de cuivre, plomb, zinc, étain, fer et fonte.

En opérant successivement avec des lames métalliques de même substance, mais d'épaisseur différente, la valeur de *a* s'est trouvée indépendante de cette épaisseur, ce qui était dû à une couche adhérente provenant de la vapeur condensée. C'est alors que M. Peclet renonça à l'emploi de la vapeur et la remplaça par l'eau du réservoir R (*fig.* 586) muni de l'agitateur *rr*. Cette eau étant à 25°, et l'eau du vase intérieur, à la température de l'air, les temps nécessaires pour produire une même élévation de température dans ce dernier furent de 500s et 380s, avec des plaques de plomb ayant pour épaisseur 20mm et 15mm; et comme on a 500 : 375 = 20 : 15, il ne s'en faut que

de 5ˢ que les temps soient proportionnels aux épaisseurs. Ce qui vérifie la loi des épaisseurs.

Mesure du coefficient. — Dans des expériences faites avec une plaque de plomb de 20ᵐᵐ d'épaisseur, la température du réservoir R était de 24°,04, et les excès observés, de 8°,91 et 9°,55 ; ce qui donna la valeur $a = 0{,}000294$ Si l'on connaissait la quantité de chaleur absorbée par l'eau du vase intérieur pour s'échauffer ainsi, on aurait la quantité de chaleur qui a traversé la plaque pendant 1ˢ. Pour la calculer, il faut d'abord choisir une unité de chaleur. Les physiciens ont adopté pour cette unité ***la quantité de chaleur capable d'élever de 1° la température de 1ᵏ d'eau.*** Or, le poids de l'eau du vase intérieur était de 3ᵏ287 [1]. On aura donc $0{,}000294 \times 3{,}287$, pour représenter la quantité de chaleur qui a traversé la plaque de plomb pendant une seconde. Pour avoir la quantité qui serait passée à travers une lame de 1ᵐᵐ d'épaisseur il faut multiplier cette quantité par 20, d'après la loi des épaisseurs. Enfin, en divisant le résultat par la surface de la plaque, qui était de 0ᵐᶜ,005026, on aura la quantité qui aurait traversé une surface d'un mètre carré. M. Peclet a trouvé ainsi pour représenter le coefficient de conductibilité du plomb, 3,82, ***unités de chaleur.***

807. LOI DES TEMPÉRATURES DANS UNE BARRE. — Considérons une barre prismatique dont une des extrémités soit entretenue à une température constante. La première tranche transversale non échauffée directement recevra de la chaleur de celle qui la précède, en perdra une partie par son contour extérieur et communiquera le reste à la tranche suivante. De même, celle-ci perdra par son contour une partie de la chaleur reçue et en cédera à la tranche qui vient après ; et ainsi de suite. Il arrivera un moment où chaque tranche recevra autant de chaleur de celle qui la précède, qu'elle en perdra par son contour et par transmission à la tranche suivante, alors les températures des différentes tranches seront stationnaires ; et la chaleur passant par une tranche sera égale à celle qui se perd, par le rayonnement et le contact de l'air, dans la portion de la barre qui se trouve au-delà de cette tranche.

On voit que les températures seront de plus en plus faibles à mesure qu'on s'éloignera de l'extrémité échauffée ; de plus, la température à une même distance de cette extrémité sera d'autant plus basse que la section de la barre sera plus petite. En effet, si nous considérons des barres de même substance et de sections semblables, le contour par lequel se perd la chaleur varie de l'une à l'autre proportionnellement aux dimensions homologues, et l'aire de la section, par laquelle la chaleur passe d'une tranche à la suivante, varie comme le carré de ces dimensions. La perte par le contour est donc moins grande relativement, quand la section est plus grande. C'est pour cela qu'on

[1] Dans ce poids est compris le poids d'une quantité d'eau qui absorberait autant de chaleur que le vase métallique et les pièces solides qu'il contient. Nous verrons plus tard comment on peut faire cette substitution.

ne peut toucher une grosse barre de fer, à une distance assez grande de l'extrémité rougie au feu ; tandis qu'un fil de fer fin peut être tenu sans inconvénient à quelques centimètres de la partie rouge.

Formule de Fourier. — Fourier a soumis au calcul le problème qui nous occupe [1]. En supposant la section de la barre assez petite pour que la température puisse être regardée comme uniforme dans toute son étendue, il démontre que l'excès V de température sur l'air extérieur, d'une tranche située à une distance x de l'extrémité échauffée, est donné par l'équation

$$V = Ae^{-x\sqrt{\frac{ph}{sk}}} + Be^{x\sqrt{\frac{ph}{sk}}},$$

dans laquelle A et B sont des constantes, k et h les coefficients de conductibilité intérieure et extérieure, p le périmètre, s l'aire de la section de la barre, et e la base des logarithmes népériens.

Si nous supposons que la barre soit infinie, ou seulement assez longue pour que la chaleur ne puisse pas se faire sentir à l'extrémité opposée à la source, V, devra être nul pour $x = \infty$, ce qui exige que l'on ait $B = 0$. La formule se réduit donc, dans ce cas, à

$$[2] \qquad V = Ae^{-x\sqrt{\frac{ph}{sk}}} = Ae^{-xr}, \quad \text{en posant} \quad r = \sqrt{\frac{ph}{sk}}.$$

Si l'on y fait $x = 0$, on a $V = A$. La constante A représente donc l'excès de la température de la source sur l'air ambiant.

Conséquences. — Pour une autre barre à section semblable, exposée à la même source de chaleur, on aurait

$$V' = Ae^{-x\sqrt{\frac{p'h}{s'k}}}.$$

Si l'on veut les distances x, x', auxquelles les températures sont les mêmes pour les deux barres, on posera

$$e^{-x\sqrt{\frac{ph}{sk}}} = e^{-x'\sqrt{\frac{p'h}{s'k}}}; \quad \text{d'où} \quad -x\sqrt{\frac{ph}{sk}} = -x'\sqrt{\frac{p'h}{s'k}},$$

ou bien $x^2ps' = x'^2p's$. Mais on a $p^2 : p'^2 = s : s'$, puisque les sections sont semblables ; il vient donc, en éliminant s et s',

$$x^2p' = x'^2p, \qquad \text{ou} \qquad x^2 : x'^2 = p : p'.$$

[1] Fourier, *Théorie de la chaleur*, p. 60.

Les carrés des distances à la source, des sections qui ont même température, sont donc proportionnelles aux dimensions homologues.

Supposons encore deux barres de substance différente, *de même section*, couvertes d'un même enduit, pour leur donner la même conductibilité extérieure, et soumises par un bout à la même température. Les distances des tranches de même température seront données par l'équation

$$e^{-x\sqrt{\frac{ph}{ks}}} = e^{-x'\sqrt{\frac{ph}{k's}}}, \quad \text{d'où} \quad x^2 : x'^2 = k : k',$$

ce qui montre que les conductibilités des deux substances sont entre elles comme les carrés des distances à la source, des tranches qui ont même température.

La formule [2] montre aussi que *les excès* V *de température des tranches, décroissent en progression géométrique quand les distances à la source croissent en progression arithmétique.* Car, si l'on donne à x les valeurs successives d, $2d$, $3d$, $4d$..., on aura pour V les valeurs Ae^{-dr}, Ae^{-2dr}, Ae^{-3dr}, Ae^{-4dr}...

Si l'on considère trois valeurs de V consécutives quelconques V', V'', V''', en divisant la somme des deux extrêmes par la valeur moyenne, on trouve pour la valeur de $\frac{V'+V'''}{V''}$ une quantité constante $e^{dr}+e^{-dr}$. Ce résultat est également vrai dans le cas d'une barre de longueur finie.

808. Vérifications expérimentales. — Après des essais de Franklin, d'Ingenhousz, de Mayer et de Buffon, Amontons a fait des expériences remarquables sur la distribution des températures dans une barre. Plus tard Lambert énonça la loi de la progression géométrique décroissante. Cette loi a été vérifiée par M. Biot et par Rumfort, sur des barres de fer et de cuivre[1]. Des cavités creusées à des distances égales, étaient remplies de mercure dans lequel étaient enfoncés des thermomètres; la barre était plongée à son extrémité dans du plomb fondu.

M. Despretz a aussi vérifié cette loi avec beaucoup de soin, ainsi que celle qui est relative à la valeur de $(V'+V''') : V''$. La *fig.* 588 représente l'appareil dont il s'est servi[2]. La barre *ab*, soutenue par des supports en bois sec, est échauffée à l'extrémité *a* par la flamme d'un quinquet à cheminée opaque. Un écran préserve la barre du rayonnement de la source. Des thermomètres *tt'*, placés à des distances de 10^{cm} les uns des autres, sont enfoncés dans des cavités remplies de mercure, comme on le voit en T. Les barres étaient recouvertes d'un même vernis, pour leur donner la même conductibilité extérieure;

[1] *Bibliothèque britannique* (Sciences et arts, 1804), t. XXVII, p. 310.

[2] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. XIX, p. 97; et XXXVI, p. 422.

leur section était un carré ayant 21^{mm} de côté. Les thermomètres ne devenaient stationnaires qu'au bout de 5 ou 6 heures, pour les substances de faible conductibilité. On retranchait, des températures qu'ils indiquaient, la température de l'air ambiant, et l'on vérifiait si les différences formaient une progression géométrique. Cette loi a été trouvée exacte avec les métaux qui conduisent bien la chaleur. Pour le plomb, qui conduit moins bien, il y a déjà des discordances sensibles; par exemple, le rapport entre les excès des températures des deux premiers thermomètres étant 2,72, le rapport suivant n'est que 2,64.

Les substances qui conduisent mal la chaleur, comme le marbre, la terre à briques, s'écartent beaucoup de la loi. Ces discordances s'expliquent facilement, en remarquant que la théorie suppose que la température est la même dans

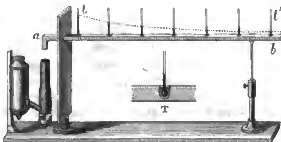


Fig. 588. — $^1/_{12}$.

toute l'étendue d'une section de la barre, ce qui ne peut être quand le pouvoir conducteur est faible; la température, dans ce cas, est plus basse près du contour de chaque tranche qu'au milieu. De plus, la perte par le rayonnement ne suit pas exactement la loi de Newton pour toutes les tranches, car la température du premier thermomètre atteignait 40° et 50° au-dessus de l'air ambiant.

809. Evaluation des pouvoirs conducteurs. — Pour comparer les pouvoirs conducteurs, il suffirait de chercher à quelles distances de la source les températures sont égales sur deux barres de mêmes dimensions, et les coefficients seraient en raison inverse des carrés de ces distances (807). Mais, dans la pratique, il est très difficile de trouver la section où règne une température donnée, à moins qu'il ne s'y rencontre par hasard une des cavités pleines de mercure. On peut employer une autre méthode : soient d et d' les distances qui séparent les thermomètres, sur deux barres de mêmes dimensions et ayant même conductibilité extérieure h. La raison de la progression est

$R = e^{rd} = e^{d\sqrt{\frac{ph}{sk}}}$ pour la première barre (807), et $R' = e^{r'd'} = e^{d'\sqrt{\frac{ph}{sk'}}}$

pour la seconde. En prenant les logarithmes et divisant les deux égalités membre à membre, on tire

$$\frac{k}{k'} = \frac{d'^2}{d^2}\left(\frac{\log R'}{\log R}\right)^2,$$

expression qui donne le rapport des coefficients de conductibilité k et k'. Dans le tableau qui suit, la première colonne renferme les rapports trouvés par M. Despretz, en représentant par 1000 le coefficient de l'or. Dans une seconde colonne sont les nombres calculés par M. Peclet, en partant de la valeur 3,82, qu'il a trouvée pour le coefficient de conductibilité absolue du plomb (806) :

Or	1000	21,28	Etain	303,9	6,46
Platine	981	20,95	Plomb	179,5	3,82
Argent	973	20,71	Marbre	23,6	0,48
Cuivre	898,2	19,11	Porcelaine	12,2	0,24
Fer	374,3	7,95	Terre cuite des fourneaux	11,4	0,23
Zinc	363,0	7,74			

Ces résultats ont été confirmés par des expériences de M. Forbes, excepté celui qui est relatif au platine. On voit que, parmi les métaux usuels, le cuivre est le meilleur conducteur, et le plomb le plus mauvais. Pour la terre cuite, le marbre et la porcelaine, les résultats ne sont plus aussi certains, puisque la loi des décroissements de la température ne se vérifie plus aussi exactement. M. Despretz a encore comparé les pouvoirs conducteurs du *fer*, de la *fonte*, du *marbre statuaire*, de la *pierre lithographique*, de la *pierre de tonnerre* bien sèche et du *bois de sapin*[1]. Le rapport de la progression géométrique a été, en moyenne, 2,004, 2,017, 2,133, 2,10, 2,302, 2,19, pour ces diverses substances.



Fig. 589.

Conductibilité du charbon. — A ces résultats nous ajouterons ceux qui ont été trouvés par M. Violette, pour le charbon fabriqué avec le bois de bourdaine. La température à laquelle le charbon a été fabriqué a une grande influence sur son pouvoir conducteur ; ce que l'on peut rapprocher du résultat déjà énoncé, que le charbon conduit mieux quand il a été calciné. Ainsi, en représentant par 100 la conductibilité du fer, celle du charbon de bourdaine fabriqué à 200° est égale à 59,5, et quand il a été obtenu à 1500°, par 66,3. Le charbon ou plombagine artificielle des cornues à gaz d'éclairage, a donné 84,7, résultat peu différent de celui que donne le fer, et supérieur à celui qui

[1] *Comptes-rendus des séances de l'Académie des sciences* de Paris, t. XXXV, p. 540.

correspond à l'étain et au plomb. Pour obtenir ces nombres, M. Violette formait un cylindre c (*fig.* 589) avec la substance à essayer, et enfonçait, à frottement, un thermomètre t dans un trou pratiqué à l'extrémité. Ce cylindre plongeait par l'autre bout dans du mercure, m, dont la température était maintenue constante au moyen d'un courant de vapeur que l'on faisait arriver par le tube T. Les nombres ci-dessus représentent les températures stationnaires que prenait le thermomètre au bout d'un certain temps. Cette méthode, comme le remarque M. Violette, n'est pas très exacte, car elle donne le même résultat pour le cuivre et le fer, qui cependant ont des conductibilités très différentes; mais elle était la seule praticable avec les petits fragments de charbon qu'il s'agissait d'étudier.

810. Vérification de la formule générale. — La formule générale $V = Ae^{-rx} + Be^{rx}$ n'avait été vérifiée que dans le cas où la longueur de la barre est assez grande pour que la chaleur communiquée à l'une des extrémités ne se fasse pas sentir jusqu'à l'autre. M. Gouillaud l'a vérifiée dans le cas général[1]; il a reconnu par l'expérience que : 1° si l'on fait varier la longueur de la barre, B diminue sensiblement comme les termes d'une progression géométrique, quand la longueur augmente en progression arithmétique; 2° si, la longueur étant constante, on fait varier la température de la source, B varie proportionnellement à l'excès de cette dernière sur l'air environnant. On peut donc représenter cette quantité B par l'expression kTm^l, T étant l'excès de température de la source sur l'air extérieur, l la longueur de la barre, et k et m des constantes qui dépendent de sa substance et de sa section. Comme on a nécessairement $A = T - B$ quand on fait $x = 0$, la formule devient

$$V = kTm^l e^{rx} + (T - kTm^l)\, e^{-rx} = kTm^l\,(e^{rx} - e^{-rx}) + Te^{-rx}.$$

On voit que la longueur influe sur la loi des températures stationnaires, et que la formule se réduit à $V = T^{-rx}$ quand l est infini, car m^l devient nul, puisque m est nécessairement moindre que l'unité. Pour vérifier l'exactitude de la formule ainsi transformée, M. Gouillaud a pris une barre de fer dont la section était un carré de 43^{mm} de côté. Les thermomètres, enfoncés dans des cavités pleines de mercure, étaient séparés par des intervalles de 20^{cm}. Les valeurs des constantes étaient $k = 0{,}409$ et $m = 0{,}24$; on avait, de plus, $e^r = 2{,}24$, et $e^{-r} = 0{,}45$. En faisant alors varier l, x et T alternativement ou simultanément, l'accord des résultats de l'expérience avec ceux que donne la formule a toujours été satisfaisant. Les expériences ont été faites principalement sur 6 barres de 1^m à 5^m de longueur.

811. Expériences sur des barres très minces. — Quand on opère sur des barres un peu grosses, on ne peut être certain que la température est la même dans toute l'étendue d'une même section, surtout quand la substance conduit imparfaitement. Pour éviter cet inconvénient, M. Langberg a opéré

[1] *Comptes-rendus des séances de l'Académie des sciences* de Paris, t. XXXV, p. 699.

sur de simples fils métalliques. Ne pouvant creuser des cavités qui pussent recevoir des thermomètres, il évaluait la température à chaque point, en y appliquant la soudure d'un élément thermo-électrique (710), dans le circuit duquel était compris un réomètre. Mais il existait dans la manière de procéder de M. Langberg différentes causes d'erreur inaperçues qui le conduisirent à des résultats en contradiction avec les lois de Fourier si bien vérifiées par M. Despretz.

MM. Wiedemann et Franz ont repris ces expériences par une méthode analogue, en s'entourant d'une multitude de précautions et employant une disposition d'appareil qui leur a permis d'obtenir des résultats très exacts.

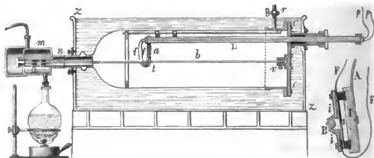


Fig. 590. — $^1/_{10}$.

La *fig.* 590 représente l'appareil employé. La barre *b* est placée dans l'axe d'une cloche horizontale en verre, fermée par un couvercle *cc* boulonné à une forte virole adaptée à la cloche. La barre est fixée au couvercle, au moyen d'une vis de pression *v*. Son autre extrémité passe par la tubulure, et entre dans un tube *o* fermé à son extrémité, et plus large en *n*, où il s'ajuste à un autre tube mastiqué dans la tubulure de la cloche. Toutes ces pièces sont disposées de manière à tenir le vide, que l'on fait dans la cloche au moyen du tube à robinet *r*. Pour échauffer la barre, on fait circuler un courant de vapeur dans un manchon *m* qui entoure le tube *o*; la cloche est plongée dans un vase en zinc *zz*, rempli d'eau destinée à maintenir sa température constante.

L'élément thermo-électrique *t*, destiné à donner les températures des différents points de la barre, est représenté à part en AB. Il est formé d'un fil de *fer* soudé en *o* à un fil d'*argentan*, et fixé par deux supports à une plaque d'ivoire I. Deux appendices en ivoire *i*, *i* embrassent la barre, dont on voit la coupe en B, et servent à guider l'élément quand on lui fait parcourir les différents points de cette barre. L'élément est suspendu à l'extrémité d'un ressort d'acier A, *a*, qui le presse contre la barre, et est soutenu lui-même par un tube en laiton L qui passe à travers une boîte à cuirs. Les fils de l'élément, *ff*, FF, traversent le tube L sans se toucher, et leurs extrémités ρ, ρ′ sont mises en communication avec les fils du réomètre.

On ne peut admettre, *à priori*, que les déviations du réomètre sont proportionnelles aux températures des points touchés. Il a donc fallu commencer par construire une table donnant les températures correspondantes aux diverses déviations. Pour cela, on a introduit dans le tube *o* une barre en cuivre, de 10^{mm} de diamètre, dont l'extrémité ne pénétrait dans la cloche qu'à une petite distance de sa tubulure. On fixait, à l'extrémité de cette barre de cuivre, un cylindre d'acier de 20^{mm} de longueur sur 5^{mm} de diamètre, dans l'axe duquel était creusée une cavité dans laquelle s'enfonçait un thermomètre donnant les dixièmes de degré. Du mercure achevait de remplir la cavité, et le thermomètre était maintenu avec de la cire. Après avoir échauffé la tige de cuivre en *mo*, on arrêtait le passage de la vapeur ; et, appliquant l'élément *t* sur le cylindre d'acier, on comparait les indications du réomètre à celles du thermomètre.

La table une fois construite, voici comment on opérait. Les barres avaient environ 60 centimètres de longueur et 6^{mm} de diamètre ; elles étaient argentées par la galvanoplastie, et polies au gratte-brosse. Quand elles étaient trop peu conductrices pour que la chaleur parvînt jusque dans la cloche, on les fixait à l'extrémité du cylindre de cuivre qui avait servi à construire la table de graduation. Après avoir chauffé pendant une demi-heure, ce qui suffisait pour obtenir une distribution constante de température, on appliquait l'élément thermo-électrique en des points distants les uns des autres de 52^{mm}. Il suffisait de 4^s à 6^s pour que la déviation du réomètre devînt constante. Pour s'assurer que les propriétés de l'élément thermo-électrique ne variaient pas, on vérifiait de temps en temps la distribution de la chaleur dans une tige de laiton.

MM. Wiedemann et Franz ayant calculé, pour chaque barre, les rapports des excès $\frac{V+V''}{V'}$, $\frac{V'+V'''}{V''}$..... les ont toujours trouvés constants, en opérant dans l'air comme en opérant dans le vide. Les lois de Fourier se trouvent donc de nouveau confirmées ; et l'on a pu calculer les coefficients de conductibilité par le moyen indiqué ci-dessus (809). Voici les résultats trouvés :

MÉTAUX.	COEFFICIENTS obtenus		MÉTAUX.	COEFFICIENTS obtenus	
	dans l'air.	dans le vide		dans l'air.	dans le vide
Argent.	100,0	100,0	Acier..	11,6	10,3
Cuivre.	73,6	74,8	Plomb.	8,5	7,9
Or..	53,2	54,8	Platine..	8,4	9,4
Laiton.	23,6	24,0	Palladium.	6,3	7,3
Etain.	14,5	15,4	Alliage de H. Rose[1].	2,8	2,8
Fer.	11,9	10,1	Bismuth.	1,8	»

[1] 1 partie d'étain, 1 de plomb, 2 de bismuth.

Les métaux les plus conducteurs ont donné les résultats les moins certains, le rapport $\frac{V+V''}{V'}$ différant pour ces métaux très peu de 2, surtout dans le vide, où la température diminue encore moins vite que dans l'air. Nous verrons plus tard que les conductibilités calorifiques ci-dessus diffèrent très peu des *conductibilités électriques*.

812. Applications. — On a fréquemment à faire des applications des différences que présentent les pouvoirs conducteurs des corps. Les poêles destinés à répandre promptement la chaleur, doivent être en métal, et présenter un long développement de tuyaux métalliques, qui laissent sortir facilement la chaleur. Souvent, au contraire, on tire parti de la faible conductibilité de certaines substances pour empêcher la chaleur de passer. C'est ainsi qu'on fait en bois, ou qu'on garnit d'osier, les anses de certains ustensiles, les manches de certains outils qui doivent être portés à une haute température. Quand on veut prendre un corps chaud, on interpose entre la main et ce corps, des substances mauvaises conductrices. On enveloppe d'étoffes épaisses, de tresses en paille, les tuyaux destinés à transporter l'eau chaude, la vapeur, l'air échauffé.

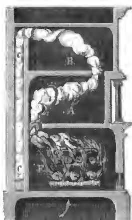


Fig. 591.

Dans les contrées du Nord, on parvient à entretenir dans les appartements une température convenable, au moyen de poêles très élevés (*fig.* 591) construits en briques, et qu'on tient allumés seulement pendant une ou deux heures de la matinée ; toute leur masse s'échauffe par la chaleur du foyer F, et par la circulation de la fumée qui traverse plusieurs chambres superposées, A, B, descend par le conduit cc, et remonte par un autre conduit parallèle à celui-ci. Quand le bois s'est transformé en braise, on ferme toutes les ouvertures, la chaleur continue à pénétrer dans la masse, et pendant le reste de la journée, cette chaleur s'échappe peu à peu et rayonne faiblement par la surface garnie en faïence vernie, de manière à compenser à chaque instant la déperdition qui se fait par les parois de la chambre. Il est évident que ces parois doivent être formées de substances conduisant mal la chaleur. Des murs en briques, de $0^m,70$ à 1^m d'épaisseur, satisfont à cette condition. Des murs en pierre ou en marbre devraient avoir une plus grande épaisseur ; aussi n'emploie-t-on que rarement ces matériaux, dans les climats rigoureux.

Des murs en planches épaisses, formant une double cloison remplie de matières très divisées, comme de la paille hachée, de la sciure de bois, de l'étoupe, des feuilles sèches, conservent aussi très bien la chaleur, et constituent

un système de construction économique dans les régions où le bois abonde. Il est essentiel que tous les joints soient parfaitement calfeutrés, pour que l'air froid ne puisse s'introduire.

Des murs mauvais conducteurs conviennent tout aussi bien dans les pays chauds, pour empêcher la chaleur extérieure de pénétrer dans les habitations. Pendant la nuit, on laisse entrer l'air frais, en ouvrant les fenêtres, que l'on tient exactement fermées pendant le jour.

II. Glacières. — Les glacières, dans lesquelles la glace amassée pendant l'hiver se conserve jusqu'à la fin de l'automne, sont construites de manière que la chaleur du dehors ne puisse pas y pénétrer; elles consistent ordinairement en une fosse profonde C (*fig.* 592), revêtue de murs, construits de préférence en briques légères qui conduisent moins la chaleur que les pierres. Au fond, est une grille *o*, sur laquelle repose la glace qui remplit la fosse. L'eau provenant de la fusion d'une partie de cette glace se rend dans un puisard, d'où on l'extrait de temps à autre. Un toit, recouvert d'une couche épaisse de paille, empêche la chaleur de l'extérieur de pénétrer. Souvent, on plante tout autour, des arbres dont le feuillage intercepte les rayons solaires. On remplit la glacière pendant qu'il fait grand froid; on y jette de temps à autre de l'eau chaude, qui se congèle bientôt en formant sur la glace une couche continue qui empêche que l'air ne puisse circuler dans la masse. On superpose ensuite une couche de paille, puis des planches chargées de pierres.

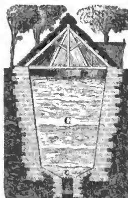


Fig. 592.

Aux Etats-Unis, on transporte au loin la glace des régions boréales; on la charge dans des navires, en blocs de 100 à 120 kilogrammes, séparés à la scie, et que l'on préserve de la chaleur extérieure, en les isolant des flancs du navire au moyen de copeaux et de sciure de bois; on remplit aussi de la même matière, les vides qui séparent les blocs. En 1851, on exportait déjà de Boston seulement, 55,000 tonneaux de glace, pour lesquels on employa pour 70,000 francs de sciure de bois, matière jusque-là sans valeur. Cette glace est transportée à la Havane, dans l'Inde, en Chine... Comme l'exportation se fait en toute saison, la glace est emmagasinée, au lieu d'extraction et au lieu d'arrivée, dans d'immenses glacières construites au-dessus du sol, tantôt en briques, et la glace est alors séparée des murs par de la sciure de bois, tantôt en charpente soutenant des couches épaisses de paille. A Boston, il y a de ces glacières contenant jusqu'à 140,000 tonneaux de glace. Malgré toutes les précautions, une bonne partie de la glace fond pendant le voyage, surtout

quand il est de longue durée ; on évalue au cinquième seulement de la quantité exportée, celle qui est vendue à Calcutta.

M. Garnier cite, dans sa météorologie, un phénomène curieux qui montre combien sont peu conductrices les matières terreuses. En 1828, après un été des plus chauds, la glace manqua en Sicile. Un géologue, M. Gemellaro, fit alors connaître l'existence, sur l'Etna, d'un banc de glace recouvert d'une couche épaisse de cendres et de scories, qui se trouvait là depuis un temps inconnu, préservé de la chaleur des étés par les masses non-conductrices qui le recouvraient. Pendant un hiver, cette glace avait été recouverte par les cendres lancées par le volcan, ces cendres s'étaient refroidies en en fondant une partie, puis avaient préservé le reste, de la chaleur des laves vomies plus tard par le volcan, et aussi de la chaleur atmosphérique.

II. Conductibilité dans les solides non homogènes.

813. Passage de la chaleur d'un corps dans un autre. — Quand la chaleur se propage d'un corps dans un autre en contact avec lui, il y a décroissement brusque de température, de la dernière tranche du corps le plus chaud à la première du corps qui reçoit la chaleur. M. Despretz a constaté ce phénomène sur deux barres de cuivre et d'étain, placées sur le prolongement l'une de l'autre, et dont les surfaces de contact étaient parfaitement unies et pressées l'une contre l'autre[1]. La différence de température de ces deux faces était de 1°,47 ; en interposant une feuille de papier mince, cette différence devint 5°,5. Comme il etait impossible de mesurer directement la température de la surface de jonction, on la concluait de celle qui était indiquée par le thermomètre le plus rapproché, en se servant d'une formule mathématique donnée par Poisson. M. Despretz a conclu de ces expériences, que la chaleur éprouve une certaine résistance en passant d'un corps dans un autre. Cette résistance se manifeste aussi quand il y a solution de continuité dans une même substance ; alors la chaleur devant passer par rayonnement à travers un espace vide, une partie éprouve des réflexions, et la transmission est diminuée. C'est pour cela que les matières très divisées conduisent généralement mal la chaleur. L'air qui remplit les vides n'augmente pas leur conductibilité, parce qu'il est, comme nous le verrons, un très mauvais conducteur.

814. Conductibilité du bois. — MM. de la Rive et A. Decandolle ont étudié la conductibilité du bois dans le sens de ses fibres et dans le sens transversal[2] ; ils ont employé des barres à section rectangulaire, dont une

[1] *Comptes-rendus des séances de l'Académie des sciences* de Paris, t. XL, p. 936.

[2] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. XL, p. 91.

extrémité était enveloppée d'une bande de fer-blanc, qu'ils échauffaient dans la flamme d'une lampe à alcool. Ils ont reconnu ainsi que le bois conduit beaucoup moins dans le sens perpendiculaire aux fibres que dans le sens des fibres; ce qui se conçoit bien, d'après ce qui précède, puisque, dans le sens perpendiculaire aux fibres, les couches du bois présentent alternativement des densités différentes. Le rapport des conductibilités dans les deux sens est de 5 : 3, pour le chêne; la différence est plus prononcée dans les bois tendres que dans les bois durs. La série des bois rangés dans l'ordre de leur pouvoir conducteur, dans le sens des fibres ou perpendiculairement, est la suivante : *alizier*, *noyer*, *chêne*, *sapin*, *peuplier*, *liége*. Les expériences dans le sens perpendiculaire aux fibres n'ont porté que sur le noyer, le chêne et le sapin.

815. Conductibilité dans les cristaux. — Les cristaux non symétriques, dans lesquels la densité et l'élasticité ne sont pas uniformes (1, 659), ne possédent pas le même pouvoir conducteur dans les différentes directions. Ce fait a été constaté par M. de Sénarmont, au moyen d'une méthode très ingénieuse, qui lui a permis d'opérer sur les très petites masses que présentent ordinairement les cristaux[1]. Il emploie des plaques minces polies, obtenues soit par clivage, soit par des procédés mécaniques, et dont la direction, par rapport aux axes du cristal, est relevée avec soin. Un petit trou un peu conique est pratiqué au milieu de la plaque; il y engage l'extrémité d'un gros fil d'argent assez long, et qui apporte au milieu de la lame la chaleur qu'il reçoit par son extrémité opposée, d'une lampe à alcool. La lame, abritée par un écran, est enduite d'une légère couche de cire, et on la place horizontalement; on voit alors la cire fondre et former, à la limite de la fusion, un bourrelet liquide qui correspond à une *ligne isotherme*, c'est-à-dire ayant partout la même température, celle de la fusion de la cire. Cette ligne est d'autant plus nettement dessinée que la plaque est moins conductrice. Quand la plaque est refroidie, ce bourrelet est encore très distinct, et on peut prendre la mesure des divers diamétres de la courbe qu'il dessine. M. de Senarmont a aussi employé comme source, un tube d'argent traversant la lame, et dans lequel il faisait passer un courant d'air chaud; ou bien encore il concentrait les rayons solaires, au moyen d'un verre ardent, sur le point qu'il voulait échauffer. Il a préféré le plus souvent le procédé que nous avons d'abord indiqué, parce qu'il permet de donner un diamètre très petit, de 0mm,25 par exemple; au trou conique, dont le contour circulaire, par lequel s'introduit la chaleur dans la lame, peut, quand il est trop grand, avoir de l'influence sur la forme de la courbe isotherme. Du reste, pour éviter les défauts de forme du trou et du fil d'argent, on fait tourner la plaque dans son propre plan, pendant la fusion de la cire; et, pour éviter les effets des défauts accidentels de structure, on opère sur plusieurs plaques égales de même substance.

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XXI, p. 657; et XXII, p. 179.

Lois. — Il a d'abord été constaté que : 1° les bords de la plaque n'ont aucune influence sur la forme de la courbe formée par la cire en fusion, quand cette courbe n'est pas trop rapprochée de ces bords ; 2° cette courbe est toujours circulaire dans les substances homogènes ; d'où il faut conclure que, si l'on faisait arriver de la chaleur en un point pris au milieu de la masse d'un corps homogène, les *surfaces isothermes* seraient des sphères ayant leur centre en ce point. Voici maintenant les résultats obtenus avec les cristaux :

1° Les cristaux symétriques autour d'un point, c'est-à-dire appartenant au premier système cristallin (I, 415), se comportent comme les substances homogènes, c'est-à-dire que les *surfaces isothermes* sont des sphères, car les lignes isothermes sont toujours des circonférences, sur des plaques prises dans des directions quelconques. Les expériences ont été faites sur le *spath fluor*, le *fer oxydulé*, le *cuivre oxydulé*, la *galène* et la *blende*.

2° Les cristaux du second et du troisième système cristallin, qui sont symétriques autour d'un axe, donnent des courbes isothermes circulaires sur des plaques prises perpendiculairement à l'axe de symétrie, et des courbes elliptiques, quand elles sont prises dans toute autre direction ; et la différence entre le grand et le petit axe de l'ellipse est la plus prononcée quand la lame est prise parallèlement à l'axe. Il résulte de là que les surfaces isothermes doivent présenter la forme d'ellipsoïdes de révolution autour de l'axe. Ces ellipsoïdes sont le plus souvent allongés dans le sens de l'axe, comme pour le *quartz* ; d'autres fois ils sont aplatis suivant cette direction, comme dans l'*idocrase*, le *fer oligiste*. Les cristaux observés sont l'*oxyde d'étain*, le *rutile*, l'*idocrase*, le *protochlorure de mercure*, le *spath d'Islande*, le *quartz*, le *béryl*, le *fer oligiste*, le *corindon*.

3° Dans le quatrième système cristallin, caractérisé par trois axes inégaux perpendiculaires entre eux, les surfaces isothermes sont des ellipsoïdes à trois axes inégaux parallèles aux trois axes cristallographiques. Il y a donc trois directions suivant lesquelles la conductibilité est maximum, moyenne et minimum. Cristaux observés : *baryte sulfatée*, *topaze*, *aragonite*, *bournonite*, *sulfure d'antimoine*, *staurotide*, *pinite*.

4° Dans le cinquième système cristallin, dans lequel un des axes est perpendiculaire au plan des deux autres qui sont obliques entre eux, les surfaces isothermes sont encore des ellipsoïdes à trois axes inégaux, et dont un est parallèle à l'axe de symétrie du cristal. Les directions des deux autres ne peuvent être assignées *à priori*. Les surfaces isothermes sont donc encore des ellipsoïdes à trois axes, dont un seul peut être déterminé d'avance. Cristaux étudiés : *glaubérite*, *feld-spath adulaire*, *feld-spath pierreux*, *pyroxène*, *augite*, *wolfram*, *gypse*.

5° Quant aux cristaux du sixième système, dans lequel les trois axes sont inégaux et obliques les uns par rapport aux autres, les analogies ont conduit M. de Senarmont à admettre que les surfaces isothermes sont des ellipsoïdes à

trois axes inégaux, dont les directions ne peuvent être connues d'avance. La difficulté de se procurer des échantillons convenables n'a pas permis de faire des expériences suivies dans ce système.

Une circonstance qui montre bien l'influence de l'arrangement régulier des molécules sur la transmission de la chaleur, c'est que les cristaux qui ne sont pas purs donnent des courbes presque circulaires, sur des plaques qui en donnent d'elliptiques quand elles sont pures. L'idocrase, entr'autres, a manifesté d'une manière marquée cette influence des matières confusément disséminées dans la masse.

816. M. Duhamel a appliqué le calcul mathématique à la distribution de la chaleur dans un milieu non homogène, comme les cristaux ; il a reconnu 1° que les surfaces isothermes sont des ellipsoïdes semblables, dont les axes sont dirigés suivant les axes principaux de conductibilité, et sont proportionnels aux racines carrées des conductibilités principales ; 2° les courbes isothermes, sur une plaque indéfinie sont des ellipses semblables qui sont les mêmes que les intersections des ellipsoïdes isothermes par un plan dirigé de la même manière que la lame ; seulement les températures ne sont pas les mêmes sur l'ellipse et sur la surface isotherme dont elle serait l'intersection par un plan, à cause de l'influence de la conductibilité extérieure de la lame. On voit que les résultats du calcul confirment de la manière la plus complète les conclusions que M. de Sénarmont avait déduites de l'expérience.

817. Conductibilité dans les corps comprimés, etc. — M. de Sénarmont a constaté que, si l'on comprime latéralement une plaque homogène, les courbes isothermes prennent, au lieu de la forme circulaire, la forme d'une ellipse dont le petit axe est dirigé dans le sens de la compression, comme si la ligne circulaire avait été aplatie par l'effort exercé[1]. Ces résultats ont été constatés sur des plaques de verre à glace, de flint-glass et de porcelaine, de 8^{mm} environ d'épaisseur, serrées entre les mâchoires parallèles d'un étau. Des lames minces en plomb étaient interposées pour éviter la rupture, et un gros fil d'argent, engagé dans un trou pratiqué au milieu de la plaque recouverte de cire, servait à y apporter la chaleur.

Une plaque de cristal de roche, parallèle à l'axe de symétrie, donne naturellement des courbes isothermes elliptiques (815). Si on la comprime dans le sens du petit axe de l'ellipse, cette courbe s'allonge ; tandis que si on la comprime dans le sens du grand axe de l'ellipse, et par conséquent dans le sens de l'axe du cristal, la courbe est moins allongée que lorsqu'on n'exerce pas de compression.

Pour reconnaître l'effet d'une extension dans un seul sens, M. de Sénarmont a infléchi une lame de verre, de manière à distendre sa surface convexe (I, 434), et a fait arriver la chaleur dans les couches les plus voisines de cette surface, en enfonçant le fil d'argent dans une cavité qui ne dépassait pas la couche

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XXIII, p. 257.

moyenne qui n'est ni dilatée ni comprimée. La fusion de la cire se fit sur la surface convexe, suivant une courbe légèrement allongée dans le sens de la dilatation. Les courbes étaient, du reste, irréguliéres, et les résultats peu marqués, mais néanmoins concluants, à cause de leur accord avec ceux que l'on observe dans la compression.

La trempe faisant varier la densité du verre, M. de Sénarmont a opéré sur des lames de cette substance, dont il avait mis diverses parties dans un état de trempe différent, en appliquant sur la lame chauffée des plaques de métal froid; mais les résultats ont toujours été peu prononcés. Ce qu'il y eut de plus marqué fut une irrégularité manifeste dans la forme des courbes dessinées par la cire fondue.

§ 2. — DE LA CONDUCTIBILITÉ DES FLUIDES.

848. CONDUCTIBILITÉ DES LIQUIDES. — On a cru pendant longtemps que les liquides, et notamment l'eau, étaient de bons conducteurs de la chaleur. Rumfort, guidé par quelques observations faites accidentellement, entreprit une suite d'expériences, par lesquelles il pensait démontrer que l'eau ne conduit pas la chaleur. Il vit un jour l'alcool contenu dans un thermomètre de grandes dimensions éprouver, pendant son refroidissement, des mouvements rendus visibles par des parcelles de poussière en suspension[1]; c'est que le liquide refroidi au contact des parois du tube devenait plus dense en se contractant, et descendait pendant que le liquide moins dense qui occupait l'axe, s'élevait. Pour éviter ces mouvements, qui tendent à mélanger les couches liquides, Rumfort eut soin dès lors de toujours échauffer par le haut les liquides dont il voulait étudier la conductibilité ; voici une de ses principales expériences à ce sujet. Il fit geler une couche d'eau au fond d'une jarre en verre (*fig.* 593); l'eau, en se congelant, forma au milieu, un monticule de glace *n*, qu'il recouvrit d'une couche d'huile, ou de mercure, à 0°. Il enfonça ensuite dans le liquide, un cylindre de fer *f* chauffé à 100°, et ne remarqua aucune trace de fusion sur la glace, quoiqu'elle fût à 0°, et que le cylindre en fût éloigné de moins d'un centimétre. Mais la durée de l'expérience fut sans doute trop courte pour que la chaleur pût pénétrer jusqu'à la glace, car nous allons voir que l'eau peut conduire la chaleur, quoiqu'elle ne la conduise qu'à un faible degré.

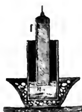


Fig. 593.

Pictet et Nicholson ayant placé un thermomètre au fond d'un vase cylindrique, le virent monter légèrement, après avoir plongé un corps chaud dans le

[1] *Essais politiques, économiques et philosophiques*, par B. comte de Rumfort, t. II.

liquide jusqu'à une petite distance du thermomètre. Pour qu'on ne puisse pas supposer que la chaleur se communique par les parois du vase aux parties inférieures du liquide, dont les mouvements mélangent ensuite les couches, J. Murray expérimenta avec de l'eau, ou de l'huile à 0°, placée au fond d'une cavité cylindrique creusée dans un bloc de glace à la même température. La chaleur reçue par les parois du vase de glace pouvait en fondre une partie, mais ne pouvait l'échauffer (693). Au bout d'un quart d'heure, la température du thermomètre avait monté de 1°,5 environ, quand il était recouvert d'une couche d'huile de $\frac{1}{2}$ pouce d'épaisseur. Dans une autre expérience, où la couche n'avait que $\frac{1}{4}$ de pouce, le thermomètre s'éleva de 2°,8 en 7 minutes. L'effet produit ne peut pas être attribué au rayonnement à travers le liquide, du vase plein d'eau bouillante qui servait de source de chaleur, car nous savons que l'eau n'est pas diathermane par la chaleur obscure (733).

Aujourd'hui, l'expérience se fait de la manière suivante : on plonge dans un liquide un thermomètre différentiel, dont l'une des boules soit peu éloignée de la surface (*fig.* 594) ; on verse de l'eau ou de l'huile bouillante dans un vase de métal dont la partie inférieure plonge dans le liquide, et l'on voit au bout de quelque temps le niveau se déplacer dans le thermomètre. — Pour le mercure, on fait passer la tige d'un thermomètre par la paroi latérale du vase, et l'on reconnaît facilement que ce liquide conduit beaucoup mieux que tous les autres. Comme le mercure n'est pas diathermane, l'épreuve est ici tout à fait concluante, et il est bien démontré que l'état liquide n'est pas incompatible avec la conductibilité ; ce qui confirme l'existence de cette propriété dans les autres liquides. Pour montrer que la conductibilité du mercure est assez prononcée, on en recouvre un thermomètre (*fig.* 595) qui traverse la paroi d'un vase en verre, on verse une couche d'alcool qu'on enflamme, et l'on voit alors le thermomètre monter, au bout d'un certain temps, de plusieurs degrés. La grande densité du mercure et sa nature métallique expliquent pourquoi son pouvoir conducteur est supérieur à celui des autres liquides.



Fig. 594.



Fig. 595.

819. Expérience de M. Despretz. — Les doutes que l'on pouvait conserver sur la conductibilité de l'eau ont été complètement levés par les expériences de M. Despretz [1]. Cet habile physicien a prouvé, en effet, que les températures dans une colonne d'eau verticale, soumise à sa partie supérieure

[1] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. LXXI, p. 206.

à une source constante de chaleur, forment une progression géométrique décroissante, comme dans une barre solide. L'appareil employé consiste en un cylindre de bois rempli d'eau, ayant 1^m de hauteur et $0^m,218$ de diamètre intérieur (*fig.* 596). Douze thermomètres, passant à travers la paroi, sont disposés horizontalement, de manière que leur réservoir se trouve dans l'axe du vase. Une caisse en cuivre mince *c*, reposant sur la partie supérieure de la colonne d'eau, recevait de l'eau bouillante qu'on renouvelait de 5 en 5 minutes. Cette eau arrivait par un tube *t* d'une chambre voisine, et l'eau moins chaude sortait par un autre tube *t'*. Un thermomètre *a* donnait la température de la caisse, qui fut en moyenne de 76°,9. Au bout de 32 heures, les thermomètres furent stationnaires, et les six premiers seuls montèrent d'une manière sensible; ce qui montre que la colonne peut être regardée comme infinie. En prenant le rapport entre deux excès consécutifs, ce rapport s'est trouvé sensiblement constant. Pour avoir une moyenne plus sûre, on prenait le rapport de deux en deux ou de trois en trois, et on en extrayait la racine carrée ou la racine cubique.

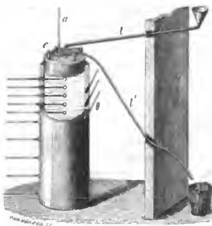


Fig. 596.

Dans une série d'expériences, M. Despretz avait disposé quelques thermomètres dont les réservoirs étaient près de la paroi, et trois autres θ dans des trous obliques et remplis de mercure, pratiqués dans la paroi même. Ces thermomètres montrèrent que la température d'une même couche horizontale va en diminuant du centre à la circonférence, ce qui prouve que la propagation dans l'eau n'est pas due à l'influence des parois du vase. Un sel dissous dans l'eau n'a pas paru en changer la conductibilité; car le quotient s'est trouvé sensiblement le même, quand ce liquide contenait 3,7 et 11,1 pour cent de sel ordinaire.

820. Communication de la chaleur dans les liquides. — Il résulte de tout ce qui précède que les liquides sont conducteurs, mais mauvais conducteurs de la chaleur. Quand la chaleur se propage dans une masse liquide, c'est ordinairement par des mouvements provenant de l'ascension de certaines parties rendues moins denses par la chaleur, et de la descente des parties les plus froides. La chaleur est donc *charriée* d'un point à l'autre par le transport des parties qui la contiennent, et non transmise par conductibilité proprement dite. Pour apercevoir ces mouvements, on chauffe par le milieu du fond, un vase

large et profond (*fig.* 597), rempli d'eau à laquelle on a mêlé des poussières de même densité, comme de la sciure de bois, qui, une fois imbibée, y reste en suspension. On voit se former un courant ascendant dans l'axe du vase, et des courants descendants le long des parois. Pendant le refroidissement, il se produit des mouvements en sens inverse. On voit donc que, pour échauffer rapidement un liquide, il faudra introduire la chaleur par le fond du vase plutôt que par le côté. Si l'on chauffait le liquide en dessus, les couches supérieures pourraient bouillir, pendant que les portions situées à une certaine profondeur ne changeraient pas de température.

Il résulte de ce qui précède, que tout ce qui gêne les mouvements d'une masse liquide doit empêcher la chaleur de s'y propager. C'est, en effet, ce que Rumfort a reconnu; il introduisit au centre d'un ballon rempli d'eau, le réservoir d'un thermomètre porté à 100°, l'eau contenant des matières qui en diminuaient la fluidité, comme de l'empois, ou qui en gênaient mécaniquement les mouvements, comme du duvet, de la ouate. Il reconnut que le thermomètre se refroidissait d'autant plus lentement que les mouvements du liquide étaient plus entravés. On explique de la même manière pourquoi les matières imbibées d'eau, les bouillies, les compotes se refroidissent si lentement, à moins qu'en les remuant on ne renouvelle continuellement les parties qui touchent les parois du vase ou sont à la surface. Les fruits charnus, les plantes grasses, dont les tissus sont imbibés de sucs emprisonnés dans des cellules, conduisent très mal la chaleur, et l'on peut produire l'ébullition en un point, au moyen d'un verre ardent, sans que la température des parties voisines change sensiblement. Enfin, cette difficulté, que la chaleur éprouve à se propager à travers les liquides qui ne peuvent circuler, est une des causes qui font que les plantes résistent à des froids qui dépassent de beaucoup le point de congélation des liquides qu'elles contiennent.

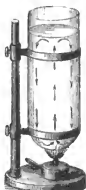


Fig. 5.7.

Les tissus des animaux sont aussi mauvais conducteurs, parce qu'ils sont remplis de différentes humeurs. Aussi, peut-on échauffer, au point de produire une douleur vive, quelque partie de la surface du corps, sans qu'on éprouve une impression de chaleur générale. Si l'on éprouve une impression de chaleur dans tout le corps, quand on se met devant le feu dans une chambre froide, c'est que le sang, en circulant, charrie la chaleur qu'il prend aux parties échauffées directement, et que cette chaleur agit ensuite comme stimulant pour accroître la quantité fournie par l'organisation.

824. Calorifères à eau chaude. — Dans les *calorifères à eau chaude*, on tire parti des mouvements qui se produisent dans les masses liquides échauffées par le bas. Ils ont été imaginés par Bonnemain, vers la fin du XVIIe siècle, pour le chauffage des couvoirs artificiels. M. Léon Duvoir les

a appliqués au chauffage des édifices. L'appareil consiste alors en une longue suite de tuyaux, formant deux systèmes; dans l'un desquels l'eau chaude monte, pendant qu'elle descend dans l'autre, après s'être refroidie en partie, en cédant de sa chaleur aux tuyaux. L'eau est échauffée dans une chaudière *c* (*fig.* 598) dont elle gagne la partie supérieure, après s'être dilatée; elle monte par le tuyau *t*. qui doit présenter le moins de courbures possible, et arrive dans un réservoir supérieur *r*, sorte de poêle à eau chaude, où elle se refroidit en cédant la chaleur aux parois, puis à l'air de la chambre. Cette eau devenue plus dense, descend par le tuyau *t'*, arrive dans le poêle P, auquel elle cède de sa chaleur, et revient à la chaudière *c*, où elle se réchauffe pour remonter de nouveau. Le dernier réservoir, *r*, porte à sa partie supérieure une ouverture qui sert à remplir l'appareil d'eau, et par laquelle s'échappe l'air qui se dégage de l'eau échauffée (I, 376).

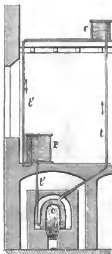


Fig. 598.

La *fig.* 599 représente une disposition de calorifère à haute température, imaginée par Perkins. L'eau est renfermée dans un système de tuyaux continus remplis d'eau. Ce liquide s'échauffe dans la partie *s* enroulée en hélice et exposée à la chaleur du foyer *f*. Cette hélice traverse un mur *o*, qui partage la chambre qu'elle occupe en deux compartiments égaux. La flamme monte dans l'un des compartiments, passe par-dessus le mur et descend dans le second compartiment, pour remonter enfin dans le conduit de la cheminée, en suivant la direction des flèches de la figure. L'eau, échauffée dans l'hélice, s'élève dans le tuyau *ttt*, et redescend par le tube *t't't'*. Ce tube forme des hélices *c'c'*, *cc*, renfermées dans des espèces de cheminées, où l'air environnant est échauffé aux dépens de la chaleur cédée par l'eau aux parois du tuyau. Un réservoir placé au haut de l'hélice *c'c'* est destiné à laisser à l'eau l'espace nécessaire pour qu'elle puisse se dilater librement, et sert aussi à recueillir l'air qui s'en dégage.

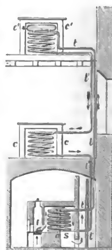


Fig. 599.

822. DE LA CONDUCTIBILITÉ DES GAZ. — La chaleur se propage dans les gaz, par des mouvements semblables à ceux que l'on observe dans les liquides; seulement ils se produisent avec une bien plus grande facilité, à cause de la

faible densité et de la grande dilatabilité des gaz. Ces mouvements empêchent de pouvoir décider facilement si les gaz possèdent une conductibilité proprement dite ; car si l'on essaie de les échauffer par la partie supérieure, comme ils sont très diathermanes, la chaleur rayonne vers la paroi inférieure du vase qui les contient, l'échauffe, et les gaz en contact avec cette paroi se dilatant, des mouvements se manifestent aussitôt. Comme les gaz n'ont qu'un faible pouvoir rayonnant (757) et que la conductibilité est due au rayonnement particulaire, on doit penser que, si les gaz sont conducteurs, ils le sont à un degré excessivement faible : c'est ce que l'on montre en gênant leurs mouvements.

Thompson a fait une multitude d'expériences à ce sujet [1] ; il employait un petit appareil, qu'il nomme *thermomètre de passage*, et qui consiste en un thermomètre ordinaire dont la boule occupe le centre d'un ballon de verre. Ce ballon étant rempli de poids égaux de substances très divisées, il le tenait plongé pendant longtemps dans l'eau bouillante, puis l'enfonçant dans la glace fondante, il observait le temps que mettait le thermomètre à baisser de 10 degrés. Il a reconnu ainsi que la chaleur du thermomètre ne passait au-dehors qu'avec une extrême lenteur, les matières filamenteuses gênant les mouvements du gaz. Il existe aussi une adhésion entre ce fluide et les substances filamenteuses ; car, si l'on plonge ces substances dans de l'eau, au-dessus de laquelle on fasse le vide, on voit chaque filament devenir comme argenté et couvert d'une infinité de petites bulles d'air qui s'en détachent. Les expériences ont été faites avec la *soie*, la *laine*, le *coton* non travaillés ; le *linge* en fine charpie ; le *duvet* du *castor*, du *lièvre blanc de Russie* et de *l'édredon*. Ces deux dernières substances sont celles qui retardent le mieux la perte de la chaleur. En général, le degré de ténuité et la distribution uniforme des filaments contribuent beaucoup à la faculté de conserver la chaleur, ce qui montre bien l'influence du gaz interposé. Les fourrures retiennent ainsi l'air logé entre les poils, et d'autant mieux qu'ils sont plus fins et plus serrés ; c'est pourquoi elles empêchent le refroidissement du corps qu'elles enveloppent.



Fig. 600.

823. Conductibilité de l'hydrogène. — Parmi les gaz, l'hydrogène paraît jouir d'une conductibilité propre assez sensible. Nous avons déjà vu (790) combien est grand son pouvoir refroidissant, et il est bien difficile de l'expliquer entièrement par sa grande mobilité. Voici quelques expériences qui prouvent que ce gaz possède une conductibilité propre assez grande. Si l'on fait rougir un fil de platine *f* (*fig.* 600), par le passage d'un courant électrique, et qu'on le recouvre ensuite d'une éprouvette remplie d'hydrogène, on voit l'incandescence cesser aussitôt. Cette expérience, due à M. Grove, peut se faire aussi en plaçant le fil incandescent au milieu d'un tube de verre, dans lequel on fait

[1] *Bibliothèque britannique* (Sciences et arts), t. 1, p. 11.

passer un courant de gaz hydrogène. A ces expériences, nous pouvons ajouter la suivante due à MM. Favre et Silbermann, sur laquelle nous aurons à revenir ainsi que sur celle qui précède. On comprime un gaz en enfonçant brusquement un piston dans un corps de pompe; ce gaz s'échauffe, et si, quand la chaleur est dissipée, on retire brusquement le piston, la température du gaz s'abaisse du même nombre de degrés. Cependant l'abaissement est toujours un peu moins prononcé que l'échauffement, parce que les parois du corps de pompe cèdent de la chaleur au gaz qui se refroidit, et que l'étendue, abandonnée au contact du gaz, par le piston qui se retire, va en augmentant. Or, la différence, qui est très petite pour les autres gaz, est très prononcée pour l'hydrogène. Par exemple, dans une expérience l'échauffement étant de 9°,7, le refroidissement ne fut que de 5°.

M. Magnus vient de constater la conductibilité du gaz hydrogène, par une méthode directe[1]. Il échauffe au moyen d'un vase plein d'eau bouillante placé au haut d'un tube vertical, un thermomètre placé au bas; ce tube étant successivement vide et rempli de divers gaz. Il a reconnu que la température finale du thermomètre est plus haute dans l'hydrogène que dans le vide, et d'autant plus que le gaz est plus comprimé. Ce gaz ajoute donc l'effet de sa conductibilité à celui du rayonnement. Avec les autres gaz, la température finale est plus basse que dans le vide, ce qui montre que leur conductibilité ne compense pas ce qui manque à leur diathermanéité. Quand les mouvements des gaz sont gênés par des substances filamenteuses, l'hydrogène manifeste encore sa conductibilité notable.

Il résulte de toutes les expériences qui précèdent, que l'hydrogène est, pour les gaz, ce qu'est le mercure pour les liquides. La conductibilité exceptionnelle de ce gaz se conçoit, du reste, quand on observe qu'il se comporte dans les actions chimiques d'une manière analogue aux métaux, qui sont les meilleurs conducteurs de la chaleur; si bien que beaucoup de chimistes considèrent l'hydrogène comme un *métal gazeux*. La grande conductibilité relative de ce gaz vient, à son tour, à l'appui de la manière de voir des chimistes.

824. Applications. — Les vêtements que l'on appelle chauds ne font qu'empêcher la chaleur du corps de se dissiper au-dehors; ils doivent cette propriété à leur structure spongieuse, et à l'air qui remplit les interstices qui existent entre leurs filaments. Si on les condensait par compression, tout en leur donnant la même épaisseur, on leur ferait perdre de leur efficacité. Les fourrures sont plus chaudes quand le poil est tourné en dedans, parce que l'air ne peut s'y renouveler, et y forme une couche stagnante d'épaisseur considérable qui arrête la chaleur. Un tissu dense, et appliqué sur la peau de manière à en écarter la couche d'air, loin de conserver la chaleur, peut favoriser sa déperdition. C'est ainsi que certains gants collants refroidissent les mains. Quand on veut empêcher un corps de se refroidir, il faut aussi l'envelopper

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. LXI, p. 380.

d'une étoffe épaisse de laine non comprimée, ou d'une fourrure. La même précaution doit être prise pour empêcher la chaleur de pénétrer dans les vases où l'on veut conserver de la glace.

Dans les pays froids, on empêche la chaleur de sortir à travers les croisées des appartements chauffés, en mettant un double vitrage fermé, soit en dressant deux châssis parallèles, soit en appliquant des vitres de chaque côté du même châssis. Dans le premier cas, on met du sable sec entre les deux châssis, et l'on y implante des cornets remplis de sel calciné, pour absorber l'humidité, qui, en se déposant sur les vitres, en troublerait la transparence. On emploie aussi ces doubles vitrages dans nos climats, pour les orangeries, les serres chaudes. L'air interposé arrête la chaleur, et pour rendre l'effet plus prononcé, on gêne les mouvements du gaz au moyen de lames de verre disposées transversalement. Les doubles vitrages offrent un autre avantage ; quand il fait soleil, ils laissent entrer les rayons solaires, tout en empêchant la chaleur ainsi introduite de pouvoir s'échapper par la même voie, comme il résulte de ce qui suit.

Chambre de Saussure. — On construit une caisse en bois léger et mauvais conducteur, dont l'intérieur est noirci, et dont une des faces est formée par trois lames de verre séparées par des couches d'air. Cet appareil, nommé *chambre de Saussure*, étant exposé aux rayons solaires, un thermomètre placé dans l'intérieur peut s'élever jusqu'à 80° à 100°, et l'on peut faire bouillir de l'eau. Pour nous rendre compte de ce résultat, remarquons que les rayons solaires qui frappent les parois intérieures de la chambre, ne pénétrant qu'à une faible profondeur, ces parois s'échauffent beaucoup à leur surface, et cèdent par contact leur chaleur à l'air intérieur. Cet air s'échauffe donc notablement. La chaleur ne peut s'échapper de la chambre, car les parois sont formées avec de mauvais conducteurs, et les lames de verre, ainsi que les couches d'air qui les séparent, ne laissent pas sortir la chaleur. Quant aux rayons émis par les parois échauffées, et dirigés vers la cloison vitrée, ils ne peuvent non plus la franchir, car le verre est très peu diathermane pour les rayons obscurs (733). Cette cloison laisse donc entrer la chaleur solaire, mais ne lui permet pas de sortir ; d'où son accumulation dans l'intérieur de la chambre. C'est par les mêmes causes que l'air s'échauffe notablement sous les cloches de verre dont on recouvre certaines plantes. J. Herschell, au cap de Bonne-Espérance, a fait une application curieuse des mêmes principes. Il a fait cuire, au moyen du soleil, un bœuf à la mode dans deux boîtes noircies garnies d'une vitre ; il y en eut pour sa nombreuse famille et ses invités.

CHAPITRE IV.

DE LA DILATATION.

§ 1. — DILATATION DES CORPS SOLIDES.

I. De la dilatation en général.

825. Dilatabilité des corps. — Dans ce chapitre et les deux suivants, nous allons étudier les effets que la chaleur produit sur les corps, à commencer par les *dilatations*.

La chaleur *dilate* tous les corps. Nous avons vu comment on peut le démontrer, dans le cas des solides, des liquides et des gaz. Ce phénomène paraît connu depuis l'antiquité la plus reculée: Parménide (— 500) dit que le feu raréfie et que le froid condense. L'Académie *del Cimento* a prouvé, par des expériences multipliées, que la *dilatabilité* est une propriété générale des corps ; et Buffon a complété la preuve en faisant voir que les matières pierreuses se dilatent aussi.

Il y a des substances qui semblent faire exception. Par exemple, l'argile bien desséchée se contracte quand on la met dans le feu; mais cela tient à ce que les molécules différentes qui composent cette substance se combinent en partie, il y a commencement de vitrification; et ce qui montre qu'il s'est fait ici un changement dans la nature chimique du corps, c'est que le volume ne reprend pas sa valeur primitive après le refroidissement. Le bois se contracte aussi quand on l'échauffe, mais c'est qu'il se dessèche; il perd de l'humidité, diminue de poids, et ne reprend pas son volume primitif quand on le refroidit.

L'augmentation de volume des corps sous l'influence de la chaleur, se nomme *dilatation*; quelquefois on l'appelle aussi *expansion* ou *raréfaction*.

826. Effets de la dilatation des solides. — Les corps solides se dilatent moins que les fluides, cependant leur dilatation produit des effets assez étendus pour qu'il soit nécessaire d'y avoir égard dans une foule de circonstances. C'est à la dilatation qu'est due la rupture des corps mauvais conducteurs exposés brusquement au feu, comme les vases en verre épais; la dilatation,

ayant d'abord lieu dans les parties extérieures, les parties non échauffées sont écartées jusqu'à la rupture. Quand le vase est mince, il peut encore se briser par les flexions qui résultent de la déformation qu'il subit en se dilatant seulement dans les parties échauffées. Si le vase est rempli d'eau, ce liquide charrie la chaleur et la distribue de manière à ce que cet effet ne se produise plus. Un métal froid appuyé sur du verre brûlant le fait fendre, en enlevant la chaleur aux parties touchées, qui se contractent et se séparent. De même, un fer rouge peut servir à diviser un tube de verre sur lequel on l'applique.

La dilatation des métaux produit des effets très marqués : les chaudières en plomb ou en zinc, placées dans des fourneaux en briques, se tourmentent jusqu'à se déchirer, si on ne leur laisse pas de jeu. Les toitures en zinc se fendent si on en soude les pièces les unes aux autres, au lieu de les superposer comme des tuiles, pour leur laisser la liberté de se dilater dans un sens. Les tuyaux de conduite, quand ils sont exposés à l'air, doivent être *compensés* : de distance en distance, on les dispose de manière qu'une partie puisse entrer dans l'autre, à travers une boîte à étoupe destinée à empêcher les fuites de liquide. Les pierres des parapets sont quelquefois brisées par les barres de fer scellées à leur partie supérieure pour les lier les unes aux autres. On a soin de laisser un espace de quelques millimètres entre les barres de fer placées bout à bout qui forment les rails des chemins de fer, afin de leur donner le jeu nécessaire pour qu'elles puissent se dilater librement. Quand la température passe de $-20°$ à $40°$, un kilomètre de rails se dilate de $0^m,72$.

Les murs des édifices se dilatent sensiblement. La clef de voûte des grands ponts s'élève et s'abaisse par les variations de température. M. Vicat a observé, au pont de Souillac, sur la Dordogne, de semblables effets, tellement prononcés que certains joints s'ouvrent quand il fait grand froid et se resserrent quand il fait chaud, surtout du côté exposé au midi [1]. Les instruments astronomiques, quand ils sont placés sur des édifices élevés, sont quelquefois sensiblement dérangés par les dilatations des murs exposés au soleil. Les édifices peuvent même être soulevés par la dilatation du sol ; c'est ainsi que l'on a constaté que l'observatoire d'Armagh, celui du collége de la Trinité, à Dublin, sont plus hauts pendant l'été que pendant l'hiver.

Force développée par la dilatation. — Quand on échauffe une barre *non flexible*, appuyée par ses deux extrémités contre des obstacles très résistants, elle se dilate, et les force à céder, tant est grande l'énergie avec laquelle se fait la dilatation. Pour empêcher cet effet, il faudrait exercer un effort capable de comprimer la barre dilatée, de toute la quantité dont elle s'allonge ; et nous avons vu (I, 427) combien cet effort est considérable. Si la barre est échauffée et fixée par ses extrémités à des obstacles, elle les rapproche quand elle se refroidit ; à moins que la résistance qu'ils opposent

[1] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. XXVII et XXXVI.

ne soit équivalente à l'effort capable de produire la rupture, ou d'allonger cette barre par tension, d'une quantité égale à celle dont elle se contracte par le refroidissement. Une barre de fer de 1^m de long se dilate de 0,0012 pour 100°. La formule $l = \frac{1}{K} \frac{PL}{s}$ (I, 426) donne, dans le cas d'une barre de 25^{cm} carrés de section, ou $2\,500^{mm}$ carrés, $P = 63\,000^{kil}$, en prenant pour le coefficient d'élasticité de fer, le nombre rond 21000. Cette valeur de P représente l'effort qu'il faudrait exercer pour empêcher une barre carrée de 5^{cm} de côté de se contracter de 100° à 0°, ou de se dilater de 0° à 100°.

Applications. — On doit à Molard une application curieuse de la force développée par la contraction des barres qui se refroidissent. Les murs d'une galerie voûtée du Conservatoire des Arts et Métiers de Paris, avaient été écartés par la poussée de la voûte, et l'édifice menaçait ruine. Pour remédier à cet état de choses, Molard disposa une série de barres de fer *a*, *c*, *a*, *c*..... (*fig.* 601) traversant les murs, et terminées aux deux bouts par des vis munies d'écrous.

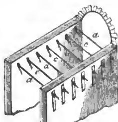


Fig. 601.

Ces barres furent chauffées fortement au moyen de charbons ardents placés sur des grillages qu'on y suspendait. D'abord on fit chauffer seulement les barres *a*, et quand elles se furent dilatées, on serra extérieurement les écrous, qui s'appuyaient sur des madriers épais, afin de répartir la pression sur une grande étendue. On laissa ensuite refroidir les barres *a* ; elles se contractèrent, et les murs, pressés par les écrous, se rapprochèrent d'une quantité égale à la contraction. Les barres *c* furent échauffées à leur tour ; on serra leurs écrous, on les laissa refroidir, et les murs furent de nouveau rapprochés. En continuant ainsi de chauffer alternativement les systèmes des barres *a* et *c*, on parvint à ramener les murs dans leur aplomb, et on laissa en place les barres échauffées en dernier lieu, pour empêcher l'écart de se reproduire.

On tire encore parti de la contraction des corps qui se refroidissent, pour fretter les roues des voitures : on entoure la jante d'un cercle de fer fortement chauffé et prenant bien juste. Par le refroidissement, cette bande de fer se contracte et serre fortement le contour de la roue, dont toutes les parties sont ainsi maintenues avec une grande force. Les cercles de fer à rebord qui entourent les roues des locomotives et des wagons des chemins de fer se placent par le même moyen. Quand on veut enlever ces cercles, on les fait chauffer pour les dilater et en agrandir le contour.

II. Mesure de la dilatation linéaire des solides, entre 0° et 100°.

827. Quand on veut calculer les effets de la dilatation, il faut connaître la quantité dont les divers corps se dilatent pour un échauffement donné et sous des dimensions connues. Cette quantité étant très petite, on a imaginé, pour la mesurer, des moyens très précis que nous allons faire connaître. Il y a dans le cas des corps solides, deux espèces de dilatation à considérer : la dilatation dans un seul sens ou *dilatation linéaire*, et la dilatation en volume ou *dilatation cubique*,

Muschenbroeck est le premier qui se soit occupé de mesurer les dilatations linéaires des solides. La barre en expérience traversait la paroi d'une caisse pleine d'eau chaude, et son extrémité poussait un système d'engrenages faisant mouvoir une aiguille. Ce procédé ne pouvait donner qu'une grossière approximation, parce que, entr'autres, la barre n'était pas toute entière dans l'eau chaude. Bouguer a fait, à Quito, un grand nombre d'expériences par un procédé qui ne pouvait que faire connaître l'ordre dans lequel sont placés les métaux relativement à la dilatabilité. Sméaton employait un appareil analogue au *pyromètre à cadran* (*fig.* 524) ; il le plongeait entièrement dans l'eau chaude, de manière qu'il n'obtenait réellement que la différence entre la dilatation de la barre et celle de la table de bois de l'appareil. F. Berthoud a employé un moyen analogue : une des extrémités de la barre et l'axe de l'aiguille étaient fixées à une plaque de marbre, dont la dilatation affectait aussi les résultats. L'appareil était placé dans une étuve, et des thermomètres, appuyés sur le marbre, donnaient la température. Dans ces sortes d'expériences, la principale difficulté consiste à donner à la barre une température bien uniforme, et à rendre une de ses extrémités parfaitement fixe. Lavoisier et Laplace, en 1781 et 1782, et le général Roy, en 1787, sont parvenus à vaincre ces difficultés. Pour obtenir une température uniforme, ils plaçaient la barre horizontalement dans un bassin plein d'eau chaude ; si elle eût été verticale, les différentes couches de liquide n'auraient pas eu exactement la même température.

828. Expériences de Lavoisier et Laplace. — Le travail de Lavoisier et Laplace n'avait pas été publié lors de la catastrophe qui enleva à la science, d'une manière si cruelle, le premier de ses savants éminents; ce travail a été publié, en 1816, par M. Biot qui en avait reçu le manuscrit, de la veuve de Lavoisier[1].

L'appareil imaginé par Lavoisier et Laplace consiste en quatre massifs en pierre de taille *m*, *m*, *m*, *m* (*fig.* 602), fondés en plein air, à 2 mètres de profondeur, et entre lesquels est placé un fourneau en briques, soutenant une cuve de plus de 2 mètres de long. Dans cette cuve est placée la barre *bo* que l'on veut observer. Cette barre s'appuie sur des rouleaux soutenus par des

[1] *Traité de physique expérimentale et mathématique*, t. I, p. 146.

bandes de verre *l*, *l*, dont on voit la disposition à part en *l'* ; *r* est un des rouleaux, et *o'* la section de la barre. Les bandes de verre *l*, *l* sont fixées à des traverses horizontales qui s'appuient sur les massifs. Cette disposition permet à la barre de se déplacer dans le sens de sa longueur, sans éprouver aucune résistance. L'extrémité qui doit rester fixe s'appuie sur une bande de verre verticale *eo* (*fig.* 602 et 603), soutenue en *e*, *e* par une traverse fixée à deux des massifs, et retenue par une barre horizontale *c*, qui l'empêche de reculer, de manière qu'elle présente à la barre *bo* un point d'appui solide. L'extrémité *b* de cette barre presse une bande de verre *tb* fixée à une tige cylindrique *aa*, qui peut tourner sur elle-même, et entraîner dans son mouvement une lunette à réticule, L, qui lui est perpendiculaire, et qui décrit un angle quand la barre *bo*, en se dilatant, pousse la bande de verre *tb*, et fait ainsi tourner l'axe *aa*. Quand la lunette se déplace, le fil horizontal du réticule parcourt les divisions d'une échelle verticale $\alpha\beta$ (*fig.* 603), placée à une distance d'une cinquantaine de mètres.

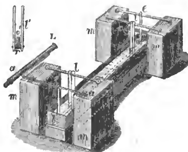


Fig. 602.

Les expériences étaient faites de la manière suivante : la barre était d'abord entourée d'eau à 0°, et l'on observait sur quelle division de l'échelle se projetait le fil de la lunette. On retirait ensuite par un robinet, l'eau glacée, et on la remplaçait par de l'eau bouillante[1] ; la température, donnée par des thermomètres placés à côté de la barre, devenait bientôt stationnaire. On observait alors sur quelle division de la mire se projetait le fil de la lunette, et l'on en concluait le nombre de divisions que ce fil avait parcourues. Au moyen de ce résultat on calculait la quantité dont la barre s'était allongée. Soient $a\alpha$ et $a\beta$ (*fig.* 603) les deux positions successives de la lunette, et bb' l'allongement cherché de la barre ; les triangles abb' et $a\alpha\beta$ sont semblables ; on a donc $bb' : \alpha\beta = ab : a\alpha$. Le rapport entre bb' et $\alpha\beta$ est donc constant et égal à $ab : a\alpha$; si donc ce rapport est une fois connu, il suffira de mesurer $\alpha\beta$,

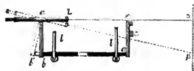


Fig. 603.

[1] Dans les premières expériences, on chauffait la cuve au moyen du fourneau placé au-dessous ; mais ce moyen était trop long, et la chaleur pouvait se communiquer aux diverses parties de l'appareil, et en les dilatant, en modifier les dimensions.

pour en conclure la dilatation bb'. Or, une expérience directe avait donné le report $\frac{1}{744}$. La dilatation cherchée sera donc $\frac{1}{744}\alpha\beta$. Cette dilatation est obtenue ainsi avec une grande exactitude, car l'erreur commise dans la mesure de $\alpha\beta$ est divisée par 744.

Méthode de Roy et Ramsden. — L'opticien Ramsden a construit, sous la direction du général Roy, un appareil dans lequel il a cherché à avoir un point fixe, d'une manière plus exacte que dans l'appareil précédent où la lame de verre *co* augmente d'épaisseur en se dilatant. Cet appareil consiste en trois cuves parallèles A, C, B (*fig.* 604), dans lesquelles sont trois barres d'égale longueur; celle du milieu, posée sur des rouleaux, est formée avec la substance dont on veut mesurer la dilatation. Les deux autres sont des prismes en fonte. Ces trois barres portent à leurs extrémités des tiges verticales munies de plaques percées de très petits trous o', o, o'' et n', n, n''. Les barres étant entourées de glace fondante, on les dispose de manière que les trois trous soient en ligne droite à chaque extrémité, ce que l'on reconnaît facilement en regardant à travers; alors la barre du milieu s'appuie par son extrémité de droite sur la pointe d'une vis micrométrique *v* qui traverse la paroi de la cuve C. On remplace ensuite la glace de la cuve C par de l'eau chaude, dont la température, maintenue constante au moyen de plusieurs lampes à alcool placées au-dessous, est donnée par des thermomètres couchés le long de la barre. Cette barre se dilate, et les trous n', n, n'' ne sont plus en ligne droite; alors on déplace la barre, en retirant la vis, de manière à mettre de nouveau ces trous en ligne droite. La quantité dont a tourné la tête de la vis donne alors l'allongement qu'a éprouvé la barre. La vis se dilatant par la chaleur, il y a une cause d'erreur provenant de son allongement; mais il paraît qu'elle est insensible, car les dilatations obtenues à différentes températures donnent sensiblement le même résultat, quand on les ramène à ce qu'elles seraient, si l'échauffement n'était que de 1°.

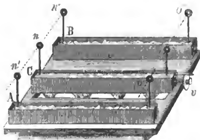


Fig. 604.

829. Lois et résultats observés. — On nomme *coefficient de dilatation linéaire* l'augmentation de l'unité de longueur d'un corps, pour une élévation de température de 1°. Il est facile de passer de l'allongement observé l, au coefficient, quand on connaît la longueur L de la barre à 0°, et l'élévation de température t. En effet, l'allongement pour l'unité de longueur, est L fois plus petit que pour la longueur L, et pour 1°, t fois plus petit que pour $t°$. Le coefficient de dilatation sera donc $k = l : Lt$. Cela suppose que la

dilatation est la même pour chaque degré. C'est, en effet, ce que Laplace et Lavoisier ont constaté jusqu'à 100° ; car ils ont toujours trouvé la même valeur pour k, quelle que fût l'élévation de température t. Il résulte de là que, *jusqu'à* 100°, *la dilatation des solides est uniforme*. L'acier semble faire exception : sa dilatation pour 1° diminue quand la température s'élève ; mais cela tient au recuit que lui fait éprouver la chaleur ; en effet on a constaté que l'acier recuit se dilate moins que l'acier trempé. Nous avons rassemblé dans le tableau qui suit les coefficients de dilatation linéaire d'un grand nombre de corps.

Suivant Lavoisier et Laplace.

SUBSTANCES.	COEFFICIENTS.	SUBSTANCES.	COEFFICIENTS.
Flint-glass anglais . . .	0,000 008 116	Or de départ.	0,000 014 660
Verre de France avec plomb	» 8 749	Or recuit (tit. de Paris).	» 15 135
		Or non recuit.	» 15 515
Tube de verre sans plomb	» 8 969	Cuivre.	» 17 173
Verre de Saint-Gobain. .	» 8 908	Laiton.	» 18 782
Acier non trempé. . . .	» 10 792	Argent (titre de Paris). .	» 19 086
Acier trempé jaune, recuit à 65°.	» 12 395	Argent de coupelle . . .	» 19 097
		Etain de Malacca. . . .	» 19 376
Fer doux forgé.	» 12 204	Etain de Falmouth. .	» 21 729
Fer rond passé à la filière	» 12 350	Plomb.	» 28 483

Suivant Sméaton.

Verre blanc	0,000 008 333	Soudure (2 cuiv., 1 zinc)	0,000 020 583
Régule martiale d'antim.	» 10 833	Etain fin.	» 22 833
Acier poule.	» 11 500	Etain en grains. . . .	» 24 833
Acier trempé.	» 12 250		
Fer.	» 12 583	Soudure blanche (1 ét., 2 plomb).	» 25 053
Bismuth.	» 13 916		
Cuivre rouge battu. . .	» 17 000	Zinc 8, étain 1, un peu forgé.	» 26 916
Cuivre rouge, $\frac{1}{8}$ d'étain.	» 18 166		
Cuivre jaune fondu. . .	» 18 750	Plomb.	» 28 666
Cuivre jaune, $\frac{1}{12}$ d'étain.	» 19 083	Zinc.	» 29 416
Fil de laiton.	» 19 333		
Métal des miroirs. . . .	» 19 333	Zinc, allongé de $\frac{1}{12}$ au marteau.	» 31 083

Suivant divers observateurs.

Fer fondu (prisme de), (suivant Roy). . . .	0,000 011 100	Platine (suivant Borda).	0,000 008 565
		Acier (Troughton). . .	» 11 918
Acier en verge (Roy). .	» 11 445	Fer tiré à la filière (id.)	» 14 401
Cuivre jaune de Hambourg (Roy). . . .	» 18 555	Cuivre (id.).	» 19 188
		Argent (id.).	» 20 826
Platine (Troughton). .	» 9 918	Palladium (Wollaston).	» 10 000

Pour trouver le coefficient de dilatation du palladium, qui est un métal très rare, Wollaston a appliqué et soudé l'une sur l'autre une lame étroite de palladium et une lame égale de platine; il remarqua que cette double lame se courbait quand on l'échauffait, et devenait concave du côté du platine; d'où il conclut que le palladium se dilate plus que le platine. Ayant ensuite remplacé le platine par l'acier, il trouva que la double lame devenait convexe du côté de l'acier, d'où il conclut que le palladium se dilate moins que l'acier; le coefficient du palladium est donc compris entre ceux du platine et de l'acier, et, par conséquent, diffère peu de 0,00001.

Nous ajouterons que le bois desséché se dilate, dans le sens des fibres, beaucoup moins que le verre, d'après Rittenhouse. D'après Roy, le sapin se dilate autant que le verre. La poterie brune ne se dilate, en longueur, que de $0,0004 = \frac{1}{2400}$ pour 100°; et suivant Wedgwood, quand on la rend poreuse avec du charbon, elle se dilate encore trois fois moins.

Le tableau qui précède montre que les métaux les plus dilatables sont le zinc et ensuite le plomb; le moins dilatable est le platine, et le verre l'est à peu près au même degré. La dureté, la ductilité ne paraissent pas avoir d'influence sur la dilatabilité. Berthollet a remarqué que les métaux les plus dilatables sont les plus fusibles, et que les moins fusibles, comme le platine, se dilatent le moins. Il en conclut que, plus un métal s'approche de la température de sa fusion, plus il doit se dilater; de sorte que le coefficient de dilatation doit augmenter à mesure que la température s'élève. Nous verrons bientôt que cette prévision s'est trouvée exacte.

Enfin, il faut remarquer que les nombres consignés dans le tableau ne conviennent qu'approximativement à d'autres échantillons que ceux qui ont servi à les déterminer. Lors donc qu'on aura besoin d'une très grande précision, il faudra procéder directement à la mesure de la dilatation de l'échantillon même que l'on voudra employer.

830. Formules des dilatations. — On a souvent à résoudre les problèmes suivants :

1° Etant donnée la longueur L d'une barre à 0°, trouver sa longueur L′ à la température t. Soit k le coefficient de dilatation linéaire de la substance de cette barre. La dilatation de l'unité de longueur pour t° sera kt, et la dilatation de L unités de longueur, sera kLt. La longueur de la barre dilatée sera donc $L + kLt$, ou $L(1 + kt)$. On aura donc

$$[1]\quad L' = L(1 + kt), \qquad \text{d'où} \qquad L = \frac{L'}{1 + kt}. \quad [2]$$

La formule [2] donne le moyen de calculer la longueur L à 0°, quand on connaît la longueur L′ à t°.

2° Etant donnée la longueur L à t°, trouver la longueur L′ à t'°. D'abord, la longueur à 0° sera $\frac{L}{1+kt}$, d'après la formule [2]; et pour obtenir la

longueur à t', il faut, d'après la formule [1], multiplier la longueur à 0° par $1+kt'$. On aura donc

$$[3] \qquad L' = L\frac{1+kt'}{1+kt}.$$

On peut trouver autrement la valeur de L' : l'accroissement de température étant $t'-t$, l'augmentation de longueur sera $Lk(t'-t)$; la longueur à t'° sera donc

$$[4] \qquad L' = L[1+k(t'-t)].$$

Cette formule ne coïncide pas rigoureusement avec la formule [3] ; car, en faisant la division algébrique de $1+kt'$ par $1+kt$, on trouve pour quotient $1+(t'-t)(k-k^2t+k^3t^2-.....)$. Mais comme k est une fraction très petite (sa plus grande valeur est 0,000031 pour le zinc), k^2, k^3,.... doivent être négligés, comme étant des quantités beaucoup plus petites que les erreurs commises en mesurant k. Le quotient devient alors $1+k(t'-t)$, et les formules [3] et [4] se confondent l'une avec l'autre.

III. Dilatation cubique. — Dilatations au-delà de 100°.

831. Calcul du coefficient de dilatation cubique. — Quand on connaît le coefficient de dilatation linéaire d'un corps homogène, il est facile d'en déduire son coefficient de dilatation cubique. En effet, considérons un cube ayant pour côté l'unité de longueur. Ce cube n'est autre chose que l'unité de volume. Si on l'échauffe de 1°, deux faces opposées s'écarteront d'une quantité égale au coefficient de dilatation linéaire, de manière que, en appelant k ce coefficient, le cube aura pour côté $1+k$. Son volume sera donc $(1+k)^3 = 1^3+3k+3k^2+k^3$. L'augmentation de l'unité de volume pour 1°, ou le coefficient de dilatation cubique, est donc $3k+3k^2+k^3$; mais comme k est une fraction très petite, k^2 et k^3 doivent être négligés, et le coefficient de dilatation cubique se réduit à $3k$. On peut donc dire que *le coefficient de dilatation cubique est égal à trois fois le coefficient de dilatation linéaire.*

On verrait de même que le *coefficient de dilatation en surface est égal au double* du coefficient de dilatation linéaire.

Formules des dilatations cubiques. — Quand on connaît le volume V d'un corps à une certaine température t, ainsi que son coefficient de dilatation cubique K, on calcule son volume V' à une autre température t', au moyen des formules

$$V' = V\frac{1+Kt'}{1+Kt}, \qquad \text{ou} \qquad V' = V[1+K(t'-t)]$$

qui se démontrent de la même manière que les formules relatives aux dilatations linéaires.

832. Dilatation des enveloppes. — Les formules qui précèdent s'appliquent aux changements de capacité intérieure des vases soumis à l'action de la chaleur. Pour le prouver, il suffit de faire voir qu'une cavité comprise dans une enveloppe solide homogène, augmente de la quantité même dont se dilaterait une masse solide qui la remplirait, et qui serait de la même substance que l'enveloppe. Soit *ma* et *nt* (*fig.* 605) deux plans parallèles tangents à la surface intérieure d'un vase. Divisons la paroi en tranches minces, par des plans parallèles à ces plans tangents. Quand on échauffera le vase, les tranches α, β, γ..... se dilateront, et les plans qui les limitent s'écarteront de quantités proportionnelles à leur épaisseur. Il en résulte que les deux plans tangents *ma*, *nt* s'écarteront de la somme des dilatations des tranches, c'est-à-dire d'une quantité proportionnelle à la somme des épaisseurs de ces tranches, ou d'une quantité égale à celle dont s'écarteraient ces mêmes plans s'ils étaient tangents extérieurement à la masse solide qui remplirait le vase, et à la surface extérieure de laquelle les points *m* et *n* appartiendraient. Ce raisonnement étant indépendant de la direction donnée aux plans *ma*, *nt*, on en doit conclure le principe énoncé.

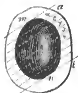


Fig. 605.

On voit aussi que le volume extérieur augmente comme si la cavité intérieure n'existait pas.

Preuve expérimentale de la dilatation des enveloppes. — On peut d'abord constater l'augmentation du volume extérieur, au moyen de l'anneau de S'gravesande (I, 35). On montre l'augmentation de la capacité intérieure pendant la dilatation, par l'expérience suivante : on plonge dans l'eau chaude un ballon de verre (*fig.* 606) rempli d'un liquide qui occupe une partie du tube capillaire qui le surmonte, et l'on voit, au premier moment, le niveau baisser dans le tube ; ce niveau remonte ensuite et dépasse sa position primitive. Ce phénomène, qui avait autrefois beaucoup étonné les physiciens, a été expliqué par Amontons : l'enveloppe solide s'échauffe la première, se dilate et augmente de capacité ; d'où l'abaissement de niveau. Quand la chaleur a pénétré jusqu'au liquide, ce dernier se dilate à son tour, et comme il est plus dilatable que la substance solide, le niveau s'élève au-delà de sa position initiale.


Fig. 606.

833. Mesure directe de la dilatation cubique. — Quand on passe du coefficient de dilatation linéaire au coefficient de dilatation cubique, on multiplie par 3 l'erreur commise dans la mesure du premier. Il vaudrait donc mieux mesurer directement le coefficient de dilatation cubique et en conclure le coefficient linéaire, car alors l'erreur serait, au contraire, divisée par 3. C'est

ce qu'ont fait Dulong et Petit en s'appuyant sur la connaissance du coefficient de *dilatation absolue* du mercure qu'ils ont d'abord déterminé par le moyen que nous indiquons plus loin (846).

Relation entre les dilatations absolue et apparente d'un liquide. — Cette méthode s'appuie aussi sur une relation simple entre le coefficient de dilatation absolue du mercure, celui d'une enveloppe solide dans laquelle le mercure serait renfermé, et la *dilatation apparente* de ce liquide, c'est-à-dire l'augmentation de volume telle qu'on l'observe dans ce vase, en ne tenant pas compte de l'augmentation de capacité qu'il éprouve. Supposons que le mercure soit contenu dans un tube thermométrique, et soit v son volume à 0°, et v' son volume à la température de 1°, tel que l'indique la graduation du tube; D le coefficient de dilatation absolue du mercure, Δ son coefficient de dilatation apparente, et K le coefficient de dilatation cubique du verre. Le volume réel occupé par le mercure sera $v'(1+K)$, car le volume v' indiqué sur l'enveloppe doit être augmenté de la quantité dont cette enveloppe se dilate pour un degré. v étant le volume réel du mercure à 0°, on a aussi $v(1+D)$ pour son volume à 1°. En égalant ces deux valeurs, il vient

$$v'(1+K)=v(1+D); \quad \text{d'où} \quad \frac{v'-v}{v}=D-\frac{v'}{v}K,$$

en divisant tous les termes par v. Or, v' diffère très peu de v, on peut donc, à cause de la petitesse du nombre K, remplacer sans erreur sensible, le rapport $v':v$ par l'unité. De plus, $(v'-v):v$ représente le coefficient de dilatation apparente Δ du mercure; car c'est l'accroissement apparent de l'unité de volume pour 1°. On a donc

$$[5] \qquad \Delta=D-K, \qquad \text{ou} \qquad D=\Delta+K.$$

Le coefficient de dilatation absolue d'un liquide est donc égal à son coefficient de dilatation apparente, augmenté du coefficient de dilatation cubique de l'enveloppe qui le contient.

Coefficient du verre. — Cela posé, il suffira, pour obtenir K, de mesurer Δ, en supposant connu le coefficient D de la dilatation absolue du mercure. Nous avons vu (699) comment on peut mesurer son coefficient Δ de dilatation apparente dans le verre, par deux méthodes différentes, entr'autres au moyen du thermomètre à poids. C'est en se servant de ce dernier instrument que Dulong et Petit ont mesuré le coefficient de dilatation cubique du verre. Ils ont essayé d'appliquer la même méthode au fer façonné en forme de réservoir à tube étroit; mais comme il y a, dans ce cas, un peu d'incertitude, parce qu'on ne sait pas s'il ne reste pas quelque bulle d'air, ils ont employé le procédé suivant, en s'appuyant sur la connaissance du coefficient du verre.

834. Méthode générale pour mesurer la dilatation cubique. — Le fragment du corps à étudier est introduit dans un tube de verre de 4 à

6 décimètres de longueur, dont on effile ensuite l'extrémité ouverte, comme pour faire un thermomètre à poids. On a soin que ce corps présente des saillies, de manière qu'il ne touche les parois du tube que par quelques points (*fig.* 607). On remplit ensuite le tube, de mercure que l'on dessèche par l'ébullition, et qu'on laisse refroidir pendant que l'ouverture plonge dans du mercure sec. L'appareil étant ainsi rempli de mercure à la température t de l'air ambiant, on le pèse, et on le dispose horizontalement dans une cuve remplie d'huile, qu'on agite et dont on peut élever la température jusqu'à 300°.



Fig. 607.

Quand cette température T est devenue stationnaire, on l'évalue au moyen d'un thermomètre à poids, couché à côté de l'appareil, et l'on pèse le mercure sorti de cet appareil par l'extrémité effilée qui traverse les parois de la cuve. Pour conclure de cette expérience le coefficient de dilatation du corps, on établit une équation qui exprime que le volume du réservoir de verre, à la température à laquelle on l'a porté, est égal au volume dilaté du mercure *qui reste*, augmenté du volume du corps aussi dilaté. Soient $\theta = T - t$ l'élévation de température de l'appareil, P le poids du corps et d sa densité à $t°$, P′ le poids du mercure contenu dans l'appareil à $t°$, et d' sa densité à la même température. Les volumes du corps et du mercure seront, à $t°$, $\frac{P}{d}$ et $\frac{P'}{d'}$, et celui du réservoir de verre à la même température, sera égal à leur somme $\frac{P}{d}+\frac{P'}{d'}$. Soient enfin x, D et K les coefficients de dilatation cubique du corps, du mercure et du verre, et p le poids du mercure sorti de l'appareil à la température T. Le mercure qui reste, ramené à la température de $t°$ occupera le volume $\frac{P'-p}{d'}$. On aura donc

$$\left(\frac{P}{d}+\frac{P'}{d'}\right)(1+K\theta)=\frac{P'-p}{d'}(1+D\theta)+\frac{P}{d}(1+x\theta),\quad \text{d'où l'on tire}$$

$$\frac{p}{d'}(1+D\theta)=\frac{P}{d}x\theta+\frac{P'}{d'}D\theta-\left(\frac{P}{d}+\frac{P'}{d'}\right)K\theta,$$

équation d'où l'on tirera la valeur de x. On voit qu'elle exprime que le volume de mercure sorti est égal à la dilatation du corps, augmentée de celle du mercure et diminuée de celle de l'enveloppe ; car le premier membre représente le volume du mercure sorti, ramené à la densité $\frac{d'}{1+D\theta}$ qui correspond à la

température T. On aurait pu poser l'équation immédiatement sous cette dernière forme.

Dulong et Petit ont mesuré, par ce moyen, le coefficient de dilatation cubique du *fer*, du *platine* et du *cuivre*. Comme cette dernière substance est attaquée par le mercure, ils avaient pris la précaution d'en oxyder légèrement la surface.

835. Dilatation au-delà de 100°. — Par ces différents moyens, Dulong et Petit ont d'abord confirmé que la dilatation des solides, pour une même élévation de température, est constante jusqu'à 100° ; au-delà, il n'en est plus ainsi, et la dilatation, quand on passe de $t°$ à $(t+1°)$, va en augmentant à mesure que t augmente, *cette température étant donnée par le thermomètre à air*. Pour rendre ces résultats plus faciles à saisir, Dulong et Petit ont calculé les températures τ qui seraient indiquées par l'allongement de règles formées avec diverses substances, en se servant de la formule $L' = L(1+k\tau)$ (830), dans laquelle on suppose k constant et égal à la valeur trouvée au-dessous de 100°, et L' donné par l'expérience, pour la température t indiquée par le thermomètre à air. Dans le tableau suivant sont inscrits les coefficients K de *dilatation cubique* du verre, du fer, du cuivre et du platine, et à côté les températures τ, comparées à celles du thermomètre à air, que donneraient des thermomètres fondés sur les dilatations linéaires, supposées constantes, de ces substances.

TEMPÉRATURE du thermomètre à air.	VERRE.		FER.		CUIVRE.		PLATINE.	
	K	τ	K	τ	K	τ	K	τ
100°	$\frac{1}{38700}$	100°	$\frac{1}{28200}$	100°	$\frac{1}{19400}$	100°	$\frac{1}{37700}$	100°
200°	$\frac{1}{36300}$	213,2	»	»	»	»	»	»
300°	$\frac{1}{32900}$	352,9	$\frac{1}{22700}$	372,6	$\frac{1}{17700}$	328,8	$\frac{1}{36300}$	311,6

Les coefficients moyens de *dilatation linéaire* des mêmes substances sont alors pour les diverses températures données par le thermomètre à air :

	ENTRE 0° ET 100°	ENTRE 0° ET 200°	ENTRE 0° ET 300°
Platine....... ..	0,000 008 842	» » »	0,000 009 183
Verre.	» 8 613	0,000 009 225	» 10 108
Fer.............	» 11 821	» » »	» 14 684
Cuivre..........	» 17 182	» » »	» 18 832

On voit que la dilatabilité des solides, rapportée au thermomètre à air, va en croissant au-delà de 100°, et différemment pour chacun d'eux. Ce résultat est confirmé par des expériences antérieures [1], faites aussi par Dulong et Petit, par une méthode imaginée par Borda, qui permet de conclure la dilatation d'une substance, de celle d'une autre.

836. Comparaison des dilatations de deux barres. — La méthode dont il s'agit offre l'avantage de ne pas exiger de point absolument fixe. Les deux règles à comparer sont liées d'une manière invariable par l'une des extrémités, au moyen d'une plaque de fer *o*, (*fig.* 608). A l'autre extrémité

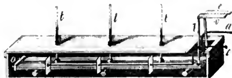


Fig. 608. — $^1/_{20}$.

sont adaptées des tiges verticales en laiton *l* dont une porte une échelle *e*, divisée en cinquièmes de millimètre, et l'autre un vernier *v*, donnant les vingtièmes de ces divisions. Les règles reposent sur des rouleaux disposés au fond d'une auge remplie d'huile dont on peut mélanger les couches au moyen de deux agitateurs à plaques *a*, *c*. Plusieurs thermomètres, dont un est couché entre les barres, donnent la température.

Quand la température est arrivée à peu près au point où l'on veut observer, on ferme toutes les ouvertures du fourneau en briques sur lequel est placée l'auge, la température devient stationnaire pendant 10 à 12 minutes, on observe les thermomètres, et l'on voit la quantité dont a marché le zéro du vernier par rapport à la division avec laquelle il coïncidait lorsque la température du bain était celle de l'air ambiant. Cette quantité représente l'excès *e* de la dilatation d'une règle sur l'autre. Si *l* est la dilatation absolue de l'une d'elles, celle de l'autre sera donnée par l'équation $x = l + e$.

Le système des deux règles forme un thermomètre particulier, dont le degré correspond au centième du déplacement relatif du zéro du vernier, lorsque la température passe de 0° à 100°. En comparant les indications de cette espèce de thermomètre avec celles du thermomètre à air, Dulong et Petit ont reconnu qu'il y a accord jusqu'à 100° ; mais que, au-delà, il y a des différences d'autant plus grandes que la température est plus élevée. Avec des barres de platine et de cuivre, la température indiquée, en supposant les dilatations de ces métaux uniformes, était de 320°, lorsque le thermomètre à mercure marquait 310°, et le thermomètre à air 300°.

[1] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. II, p. 254.

837. Dilatation du verre. — Il était important d'étudier particulièrement la dilatation du verre, si fréquemment employé dans les expériences. Dulong et Petit ayant réuni, comme ci-dessus, une règle de cuivre et une régle de verre, reconnurent que la dilatation du verre augmente au-delà de 100°, suivant une loi plus rapide que celle des métaux.

Les nombres donnés pour le coefficient du verre, par plusieurs physiciens, parmi lesquels il faut citer M. Despretz, Rudberg, M. Magnus, M. I. Pierre, ne sont pas d'accord, même entre 0° et 100°. Cela tient d'abord à la différence de composition chimique des échantillons employés. De plus, M. Regnault a reconnu que la dilatabilité d'un même verre varie suivant la manière dont il a été travaillé[1]; comme on le voit dans le tableau suivant qui contient les dilatations totales des différentes sortes de verre, entre 0° et 100°.

SUBSTANCES.	EN TUBE.	SOUFFLÉ EN BOULES DE DIFFÉRENT DIAMÈTRE.			
	Dilatation.	Diamètre.	Dilatation.	Diamètre.	Dilatation.
Verre blanc.	0,002 648	46mm	0,002 592	33mm	0,002 514
Verre vert.	0,002 299	36	0,002 132	»	»
Verre de Suède. . . .	0,002 363	34	0,002 441	32	0,002 441
Verre infusible français	0,002 142	32	0,002 242	»	»
Cristal ordinaire. . . .	0,002 101	39	0,002 330	»	»

On voit que la dilatabilité est tantôt plus grande, tantôt plus petite, quand le verre est soufflé en tube ou en boule. Les boules les plus grosses, qui sont aussi les plus minces, semblent se dilater plus que les autres. Il résulte de là que lorsqu'on veut une grande précision, il faut mesurer directement la dilatation des vases de verre dont on doit faire usage, et non la déduire de la dilatation linéaire (831); car, indépendamment de l'influence de la manière dont le vase a été travaillé, il faut observer que les parois ne sont pas homogènes, comme nous l'avons déjà remarqué ailleurs (1, 293).

Enfin, M. Regnault a encore constaté que le coefficient d'un même appareil en verre n'est pas toujours le même entre les mêmes limites de température, quand il a été porté à des températures trés différentes. C'est que le verre a éprouvé des modifications de structure semblables à celles qui produisent le déplacement du zéro des thermomètres (701).

838. Dilatation de la glace. — Les changements de volume que la glace éprouve par les variations de température, sont importants à connaître pour

[2] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. V, p. 64.

l'explication de certains phénomènes naturels, par exemple de ceux qui s'observent dans les *glaciers*. On avait émis des doutes sur la contraction de la glace par le froid, et M. Petzholdt avait même cru reconnaître que cette substance se dilate quand on la refroidit. Des expériences de M. Brunner fils, et celles qui ont été faites à l'Observatoire de Poulkowa, ont démontré que la glace se comporte comme les autres corps solides. M. Brunner a procédé, en mesurant la densité de la glace à différentes températures, au moyen de sa perte de poids dans l'huile de pétrole. La densité de ce liquide par rapport à l'eau, aux différentes températures des expériences, était en même temps déterminée par la perte de poids d'une masse de verre, ramenée toujours au même volume par une méthode de correction que nous indiquerons plus loin (888). Les morceaux de glace étaient choisis exempts de bulles d'air, et l'on opérait quand la température ambiante était inférieure à 0°. M. Brunner a trouvé ainsi, pour le coefficient moyen de dilatation linéaire de la glace entre 0° et — 6°, le nombre 0,0000375 = $\frac{1}{26700}$. La contraction de la glace par le froid est donc plus prononcée que celle des autres corps solides, car le zinc, qui se dilate le plus, a pour coefficient 0,000031.

839. Dilatation des cristaux. — Nous avons admis, pour établir la relation qui lie le coefficient de dilatation linéaire au coefficient de dilatation cubique, qu'un corps solide se dilate également dans tous les sens. C'est, en effet, ce qui a lieu pour les corps homogènes. Dans les cristaux non symétriques autour d'un point, la dilatation est différente dans différentes directions. Ce résultat, découvert par M. Mitscherlich, se constate en mesurant les angles des faces deux à deux, ce qui peut se faire avec une grande précision par des moyens que nous indiquerons dans l'optique. Par exemple, pour le spath d'Islande, les angles diminuent de 8',5 entre 0° et 100°, d'où l'on peut conclure que la dilatation suivant la plus petite diagonale du rhomboèdre, est plus grande que dans les autres directions. Chez les cristaux symétriques autour d'un axe, la dilatation est la même dans les directions perpendiculaires à cet axe. Chez les cristaux non symétriques autour d'un axe, elle est différente dans les directions des trois axes cristallographiques. M. Mitscherlich pense que la chaleur écarte davantage les molécules du cristal, dans le sens où elles sont le plus rapprochées.

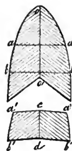


Fig. 609.

L'inégalité de dilatation dans différents sens se reconnaît facilement dans la variété de sulfate de chaux connue sous le nom de *gypse lenticulaire* ou *en fer de lance*, formée de cristaux altérés et arrondis de manière que la masse présente la forme d'une lentille. Souvent deux lentilles sont accolées l'une à l'autre et paraissent se pénétrer mutuellement; on peut alors, par le choc ou par le clivage, en détacher des fragments qui ont la forme de fer de lance (*fig.* 609). Si l'on en sépare une lame *abba* terminée par deux faces polies *aa*, *bb*, perpendiculaires

à la ligne oo', et si l'on élève la température à 80° ou 100°, l'on reconnaît que les faces aa, bb ne sont plus planes, mais qu'elles forment des angles $a'ca'$, $b'db'$; car un objet délié et vu par réflexion très obliquement sur ces faces, donne deux images, tandis que l'on n'en verrait qu'une si la face qui sert de miroir était plane.

Remarquons enfin que, d'après M. H. Kopp, certains minéraux (spath fluor, aragonite, sulfate de baryte, célestine, quartz) se dilatent plus que les métaux, contrairement à l'opinion généralement reçue. M. Kopp déduisait la dilatation, des densités déterminées à différentes températures par la méthode du flacon. Il a pris aussi quelques mesures par la méthode de Dulong (834).

IV. Application des dilatations des solides.

840. On a souvent à faire usage des coefficients de dilatation linéaire ou cubique des corps solides. Nous en avons vu des exemples dans la mesure des poids spécifiques, et dans les corrections du baromètre. Nous avons aussi fait connaître quelques applications du phénomène de la dilatation (825). Dans les constructions, où l'on emploie aujourd'hui beaucoup de substances d'espèces différentes, comme la fonte, la pierre, les briques, etc., il était à craindre que l'inégale dilatation de ces matériaux n'entraînât des mouvements irréguliers capables de les disjoindre. Des expériences de M. Adie, ont heureusement montré que les matériaux employés ordinairement dans les constructions ont des coefficients qui diffèrent très peu de celui de la fonte, de sorte que, pour les variations de température de l'atmosphère, les différences sont insensibles [1].

841. Pendules compensateurs. — La durée des oscillations d'un pendule dépend de sa longueur d'oscillation (I, 114). Or, cette longueur varie avec la température, d'où il résulte qu'une horloge à pendule retarde quand il fait chaud, et avance quand il fait froid. Ces irrégularités n'avaient pas échappé aux premiers observateurs ; Graham, en 1726, les attribua aux changements de température, et il chercha à les faire disparaître par la combinaison de deux métaux de dilatation différente. Il imagina plus tard la disposition que nous allons décrire, et construisit le premier *pendule compensateur* ou *pendule compensé*; on nomme ainsi un pendule dont la durée de l'oscillation n'est pas affectée par les changements de température.

Compensateur de Graham. — La tige ab (*fig.* 610) est en verre, et la lentille est remplacée par un réservoir cylindrique en verre bc, contenant du mercure. Quand la température s'élève de $t°$, la longueur $ac = l$ se dilate de la quantité lkt, en appelant k le coefficient de dilatation linéaire du verre, et le centre du gravité du mercure s'abaisse de cette quantité. La colonne de mercure, en se dilatant, monte dans le vase bc; et si sa hauteur est h, son

[1] *Bibliothèque universelle de Genève* (nouvelle série, 1837), t. IX, p. 403.

centre de gravité s'élève de $\frac{1}{2}h\Delta t$, en appelant Δ la dilatation apparente du mercure dans le verre. Si donc on a $lkt = \frac{1}{2}h\Delta t$, ou $lk = \frac{1}{2}h\Delta$, le centre de gravité sera relevé par la dilatation du mercure d'autant qu'il sera abaissé par l'allongement du verre. En prenant $k = \frac{1}{116100}$ et $\Delta = \frac{1}{6480}$, on trouve à peu près $h = \frac{1}{9}l$. Comme le centre d'oscillation du pendule ne se confond pas avec le centre de gravité, la compensation n'est pas rigoureusement exacte; en ajoutant ou retranchant un peu de mercure, on arrive par tâtonnement à obtenir une compensation complète; ou bien encore on élève ou l'on abaisse le vase qui contient le mercure, au moyen d'une vis *b*. Le pendule de Graham est peu employé.



Fig. 610.



Fig. 611.

Compensateur de J. Leroy. — Une traverse fixe supporte un tube de laiton *cc* (*fig.* 611), qui soutient par sa partie supérieure une barre de fer *f*. A cette barre, est suspendue la tige *f'* du pendule, au moyen d'une lame d'acier mince et flexible. Cette lame peut glisser à travers une fente pratiquée dans la traverse fixe. Les bords de la fente représentent l'axe de suspension du pendule. Quand la température s'élève, le tube de laiton se dilate de ck, en appelant c la longueur du tube de cuivre, et k son coefficient de dilatation, et le pendule remonte. En même temps les barres de fer, de longueur f et f', le font baisser, en se dilatant de $(f+f')k'$, en appelant k' le coefficient du fer; il y aura donc compensation si l'on a $(f+f')k = ck'$. Comme k' est à peu près les $\frac{2}{3}$ de k, il faudra que le tube de laiton ait à peu près les $\frac{2}{3}$ de la longueur totale du fer, ou le double de la longueur f'. On achèvera d'établir la compensation par tâtonnement, en déplaçant la lentille, au moyen de la vis qui se trouve à la partie inférieure. Ce système est peu employé, parce qu'il augmente beaucoup la hauteur de l'horloge.



Fig. 612.

On l'a remplacé par la disposition suivante. La lame d'acier qui porte le pendule (*fig.* 612) traverse une fente pratiquée dans la pièce *a*, et est fixée à un levier coudé *cob*, dont le bras *ob* s'appuie sur une barre de cuivre *nb*. Cette barre, en se dilatant, pousse le levier, et fait remonter le point *c*, de manière à compenser l'effet de l'allongement du pendule. Si L est la longueur *ah*, l la longueur *nb*, k et k' les coefficients des métaux dont sont formées ces barres, on devra avoir, pour qu'il y ait compensation, $Lk = lk'\frac{oc}{ob}$. On achève de

compenser, soit en faisant varier la position de la lentille, soit en changeant, au moyen de la vis *b*, la distance à l'axe *o*, du point sur lequel agit la barre *nb*.



Fig. 613.



Fig. 614.

Leroy a aussi disposé un compensateur formé de deux verges, l'une en acier *al*, l'autre en cuivre *cc'* arrêtée en *c* (*fig.* 613). Ces verges sont articulées avec un levier *c'o*, articulé lui-même en *o* avec une troisième verge qui porte la lentille. On voit que la verge *cc'*, en se dilatant, abaissera le point *c'*, et par conséquent relèvera le point *o* avec la lentille, pendant que la dilatation de la verge d'acier fera baisser tout le système. Ce pendule, qui paraît avoir été aussi imaginé par Graham, se dilate souvent par secousses.

Reid, en 1812, a établi un compensateur, de la manière suivante : une tige d'acier *ab* (*fig.* 614) soutient à sa partie inférieure un tube de zinc *bc*, qui l'enveloppe, et à la partie supérieure duquel est fixée la lentille, qu'il soulève en se dilatant, pendant que la dilatation de la tige *ab* la fait descendre.

M. Henri Robert a imaginé une disposition plus simple (*fig.* 615) : la tige est en platine, et supporte par sa partie inférieure une large lentille en zinc. Le centre de gravité de cette lentille conserve toujours la même distance au point de suspension, si la dilatation de la tige de platine est égale à celle du rayon de la lentille de zinc; ce qui a lieu quand ce rayon est égal au tiers environ de la longueur de la tige.

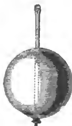


Fig. 615.



Fig. 616.

Pendule à cadre ou à gril. — Le pendule compensé le plus employé est celui que J. Harrisson a imaginé peu de temps après l'invention de celui de Graham. Le point de suspension est placé au milieu d'une pièce transversale (*fig.* 616), aux extrémités de laquelle sont fixées deux verges en fer, réunies à leur partie inférieure par une traverse. Cette traverse supporte deux verges en laiton, réunies à leur partie supérieure par une traverse à laquelle sont suspendues deux autres verges en fer. Celles-ci supportent deux nouvelles verges de laiton, à la partie supérieure desquelles est enfin suspendue une tige de fer qui porte la lentille. Les traverses sont percées de manière à laisser passer les tiges qu'elles ne soutiennent pas, et deux brides servent à maintenir l'ensemble de l'appareil.

Il est facile de voir que les tiges de laiton, en se dilatant, font remonter la

lentille, tandis que les verges de fer la font descendre. Pour que le centre de gravité reste à la même hauteur, il faudra que l'on ait $(f+f'+F)k=(c+c')k'$, en appelant f, f' les longueurs des couples de verges de fer, c et c' celles des couples de verges de laiton, et F la longueur de la tige de fer qui porte la lentille. En prenant f et f' égaux à c et c', ce qui a lieu sensiblement, il vient $(c+c')\left(\frac{k'}{k}-1\right)=F$. On a, à peu près, $\frac{k'}{k}=\frac{5}{3}$, de sorte que la longueur F du pendule est sensiblement égale à $\frac{2}{3}$ de $c+c'$. Ce calcul ne donne qu'une première approximation, car le centre de gravité de la lentille est loin de coïncider avec celui du pendule, à cause du poids des tringles, et d'ailleurs ce point ne se confond pas, même à peu près, avec le centre d'oscillation. Il faut donc achever d'établir la compensation par tâtonnement, en déplaçant la lentille au moyen de la vis qui est au-dessous. Si l'on voulait n'employer que deux verges de laiton, et par conséquent trois verges de fer, la longueur des premières devrait être $\frac{3}{2}$ F, ou $F+\frac{1}{2}F$, de sorte que ces verges dépasseraient l'axe de suspension.

842. Lames de compensation. — L'horloger Martin, a eu l'idée d'établir la compensation des pendules au moyen d'un système de deux lames métalliques de nature différente, soudées dans toute leur longueur, et fixées transversalement en c à la tige du pendule (*fig.* 617). Si la lame la plus dilatable est en dessous, le système se courbera suivant mfm, quand la température s'élèvera, de manière à soulever les masses m, m qui sont aux extrémités de la double lame. Si, au contraire, la température baisse, le système se courbera suivant $m'cm'$. Les masses m, m peuvent se déplacer en glissant le long de vis qui les traversent ; de manière qu'on peut les placer, par tâtonnement, à une distance telle que le pendule soit exactement compensé.

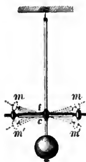


Fig. 617.

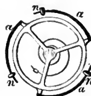


Fig. 618.

Compensateur des chronomètres. — Cette association de deux lames superposées était employée depuis longtemps pour compenser les balanciers des chronomètres. On sait que, dans ces machines si précises, le mouvement est régularisé par une roue ou balancier, munie d'un ressort spiral (*fig.* 618), et dont la durée des oscillations dépend de la force du ressort, de la masse de la roue et de son rayon. Or, quand la température s'élève, ce rayon augmente et le chronomètre retarde. Pour empêcher cet effet, il faudrait ramener vers l'axe une partie de la masse du balancier. Pour cela, on fixe sur le contour, des lames a, a, a, formées de deux métaux, dont le plus dilatable est en

dehors, et terminées par des vis qui portent de petites masses *n*, *n*, *n*. Quand la chaleur augmente le rayon de la roue, les masses *n* se rapprochent de l'axe par l'effet de la courbure que prennent les lames. En déplaçant plus ou moins les masses le long des vis qui les portent, on parvient à obtenir que la quantité dont elles se rapprochent compense l'effet de la dilatation du balancier.

813. Thermomètres métalliques. — A. Breguet a appliqué les lames de compensation à la construction d'un thermomètre très sensible. Il soude ensemble trois lames, de *platine*, d'*or* et d'*argent*, l'or étant entre les deux autres. Ce système étant passé au laminoir, il découpe dans la feuille ainsi obtenue un mince ruban qu'il enroule en hélice, de manière que l'argent soit en dedans. Cette hélice *s* (*fig.* 619) est suspendue verticalement, et son extrémité inférieure soutient une aiguille horizontale qui parcourt les divisions d'un cadran. Quand la température s'élève, chaque spire de l'hélice diminue de courbure, parce que l'argent se dilate plus que le platine, et l'aiguille change de position. Pour obtenir la grandeur d'un degré sur le cadran divisé, on porte l'instrument à deux températures différentes *t* et *t'*, données par un thermomètre à mercure, et l'on divise la distance entre les deux positions successives de l'aiguille, en un nombre $t' - t$ de parties égales ; cela suppose les déviations proportionnelles aux accroissements de température, ce qui a lieu jusqu'à 100° (829). L'anneau *a* qui soutient l'hélice *s* peut tourner dans son support, de manière qu'on peut placer l'aiguille sur le zéro de la division, avant de commencer les expériences. Une tige *t* est destinée à empêcher les oscillations de l'hélice quand on transporte l'instrument.

Le thermomètre de Breguet est d'une extrême sensibilité. Il est surtout utile quand on veut accuser des variations rapides de température ; sa faible masse lui permet de se mettre en équilibre avec une grande rapidité.

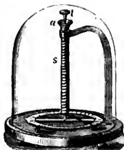
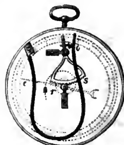


Fig. 619.


Fig. 620.

On donne aussi au thermomètre métallique une forme sous laquelle il est très portatif. La triple lame est courbée en forme d'U (*fig.* 620) ; une des extrémités est fixe, et l'autre s'appuie en *o* sur un levier du premier genre, dont le bras opposé prend la forme d'un secteur denté, *s*, ayant son centre au point d'appui du levier. Ce secteur mène un pignon denté portant une aiguille qui parcourt les divisions d'un cadran. Un ressort en spirale, *r*, agit de manière que le levier presse toujours en *o* sur la lame en U. Cet instrument se gradue comme le précédent.

Thermomètre de Borda. — Dans la mesure d'une base entre Melun et Lieursaint, lors de la grande opération de la méridienne en France, Borda sentit la nécessité de se servir d'une règle étalon dont les dilatations pussent être évaluées exactement, afin de pouvoir en tenir compte. Il eut l'idée de faire indiquer par la règle elle-même la température moyenne de ses différentes parties, qui pouvaient n'être pas toutes également échauffées, soit à cause de la proximité des opérateurs, soit à cause du contact de leurs mains. La règle



Fig. 621.

était en platine et avait 12 pieds de longueur ; à l'une de ses extrémités était fixée une règle en cuivre un peu plus courte (*fig.* 621), qui lui était superposée, l'autre extrémité de la règle de cuivre portait un vernier pouvant glisser sur une division tracée sur la règle de platine, et dont les parties étaient des millièmes de la longueur de cette règle. Si la température s'élevait, le zéro du vernier s'avançait sur les divisions, puisque le cuivre se dilate plus que le platine. Une loupe servait à distinguer plus facilement les coïncidences. En portant l'appareil dans la glace fondante, puis dans de l'eau très chaude, dont la température était donnée par des thermomètres, on avait les traits de divisions correspondant à ces deux températures, et il était facile dès lors de calculer le nombre de degrés centigrades correspondant à un nombre de divisions parcourues par le zéro du vernier (696). L'appareil constituait donc un véritable thermomètre, qui donnait exactement sa propre température moyenne. Celle-ci une fois connue, il était facile de calculer la longueur exacte de la règle de platine, en se servant du coefficient de dilatation de cette substance.

841. Pyromètres métalliques. — Cette disposition, comme celle de la *fig.* 608, fournit un appareil propre à indiquer les très hautes températures, c'est-à-dire un véritable *pyromètre* ; mais il faudrait donner aux règles une longueur embarrassante, pour rendre leurs mouvements relatifs facilement observables. Cet appareil ne peut donc constituer un pyromètre usuel.

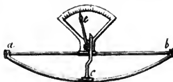


Fig. 622.

Réguier a inventé un pyromètre disposé comme son dynamomètre (I, 52). Cet instrument consiste en un arc de fer *acb* (*fig.* 622), dont les extrémités sont réunies par une verge de cuivre *ab*. Quand la température s'élève, le cuivre se dilatant plus que le fer, le point *c* se rapproche de la ligne *ab*, et une crémaillère fixée en *c* fait tourner l'aiguille *e* en agissant sur un pignon. Cet instrument doit être entièrement plongé dans le fourneau dont on veut évaluer la température, ce qui fait qu'il est peu commode à observer.

M. Brongniart a imaginé un autre pyromètre, dans lequel l'aiguille indicatrice est extérieure au fourneau, et qui sert principalement dans les fabriques de porcelaine et de peinture sur verre. Une barre de fer *ff′* (*fig.* 623) est fixée dans une rainure d'une plaque PP′ en porcelaine, substance qui se dilate à peine, même pour de très hautes températures. L'extrémité *f* s'appuie contre

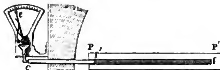


Fig. 623.

le fond de la rainure. Une barre de porcelaine *cf′* passe à travers le mur du fourneau, et presse l'extrémité *c* d'un levier dont les mouvements se transmettent à une aiguille *e*, qui peut parcourir les divisions d'un cadran. Un ressort agit sur cette aiguille, de manière que la barre *cf′* soit toujours appuyée contre la barre *ff′*. Quand cette dernière barre se dilate, l'extrémité *f′* pousse la barre *f′c*, et l'aiguille se met en mouvement. Ce pyromètre, de même que ceux que nous avons décrits précédemment, ne donne pas les températures en degrés comparables à ceux du thermomètre à mercure; car nous avons vu que les dilatations des solides vont en augmentant au-delà de 100°. Mais, dans les opérations industrielles, il suffit de pouvoir retrouver certaines températures qui conviennent aux opérations que l'on veut effectuer.



Fig. 624.

Pyromètre de Wedgwood. — Le célèbre potier anglais Wedgwood est l'inventeur du pyromètre le plus connu, qui est fondé sur la propriété qu'a l'argile desséchée d'éprouver dans le feu une contraction permanente d'autant plus prononcée que la température est plus élevée (825). L'appareil (*fig.* 624) consiste simplement en deux règles métalliques A, B, faisant entre elles un angle très petit, et fixées sur une table de cuivre. Pour donner moins de longueur à l'appareil, on place une troisième règle C formant avec B un angle égal à celui des deux autres, de manière que l'espace compris entre C et B représente celui qui existerait entre les règles A et B prolongées. La longueur totale des deux espaces angulaires est de 305 millimètres et comprend 240 divisions égales. La plus grande distance des règles est de 12mm,7, et la plus petite de 8mm,5[1].

[1] *Annales de chimie*, 1re série, t. LXXIV, p. 21.

On prépare de petits cylindres d'argile pétrie avec soin, desséchés et usés à la lime, de manière à entrer dans les régles jusqu'au zéro de la division; on les calcine ensuite au rouge sombre pour les rendre moins fragiles. Pour obtenir la température d'un foyer, on y plonge un des cylindres d'argile, et quand il en a pris la température, on le laisse refroidir, puis on le fait glisser entre les règles, entre lesquelles il s'enfonce plus ou moins, à cause du retrait qu'il a éprouvé. S'il parvient ainsi à la division 35, on dira que la température était de 35° du pyromètre. Il est évident que, pour que les résultats soient comparables, il faut que les cylindres d'argile soient tous de même nature. Ceux que Wedgwood employait contenaient 47,35 de silice, 44,29 d'alumine et 8,36 d'eau.

Wedgwood a cherché à rendre les degrés de son pyromètre comparables à ceux du thermomètre à mercure. Pour cela, il se servait, pour terme intermédiaire, d'un cylindre d'argent qui s'enfouçait plus ou moins dans une jauge en terre de pipe, qui était la reproduction d'une partie du pyromètre, pendant qu'elle était portée à la température de l'eau bouillante, puis à celle du mercure bouillant. La terre de pipe avait été rendue poreuse par du charbon, de manière que sa dilatation était extrêmement petite, même dans les hautes températures. Il trouva ainsi que le cylindre d'argent parcourait 23,4 divisions, en passant de 100° à 360°, c'est-à-dire pour 260° d'augmentation de température; ce qui fait 11°,11 centigrades environ, pour un déplacement du cylindre d'argent, d'une seule division du pyromètre. Ayant ensuite porté la jauge dans un moufle, avec un cylindre d'argile, il trouva que le cylindre d'argent devait être retiré de 66 divisions, tandis que le cylindre d'argile s'enfonçait de 2,25 divisions. Or, les 66 divisions parcourues par le cylindre d'argent correspondent à $66 \times 11°,11 = 733°$ centigrades, auxquels il faut ajouter 10° que possédait le cylindre d'argent au moment où il avait été placé dans la jauge. 743° C. correspondent donc à 2,25 divisions du pyromètre. Dans une seconde opération, le cylindre d'argent recula de 92 divisions, et le cylindre d'argile s'enfonça de 6,25. Les 92 divisions parcourues par l'argent, équivalent à 1032° C., quand on y ajoute les 10° de la température initiale. On conclut de là que la différence $1032° - 743° = 289°$ C. équivaut à $6,25 - 2,25 = 4$ divisions du pyromètre; ce qui fait une division de ce dernier pour 72° C. environ.

Si l'on veut avoir le nombre de degrés centigrades qui correspondent au zéro du pyromètre, il suffit de retrancher de 743° C. qui correspondent à 2,25 divisions du pyromètre, le nombre $72 \times 2,25 = 162$, ce qui donne 581° C. Il est évident que ces nombres dépendent de la qualité de l'argile dont on se sert; aussi Wedgwood avait-il eu le soin de préparer un très grand nombre de cylindres identiques, et d'en envoyer à la plupart des savants et des manufacturiers. Du reste, la méthode de graduation pourrait toujours s'appliquer à des cylindres de nature quelconque. Cette méthode est très ingénieuse, mais les résultats qu'elle donne ne sont exacts que dans la supposition que la dilatation de l'argent est constante dans les hautes températures; ce qui n'a pas lieu

comme nous l'avons vu. Le pyromètre de Wedgwood ne donne donc pas plus que les autres des degrés comparables à ceux du thermomètre à mercure ; mais il est précieux et d'un usage fréquent, à cause des petites dimensions du corps que l'on plonge dans le foyer, ce qui permet d'apprécier la température d'un point déterminé.

Le principe du pyromètre de Wedgwood lui a servi à reconnaître à quelle température ont été cuites les poteries antiques. Pour cela, il en a porté des fragments à des températures croissantes, et a observé, dans des essais successifs au pyromètre, à quelle température le fragment commençait à se contracter. Cette température est celle à laquelle la poterie a été soumise dans la cuisson. C'est ainsi que Wedgwood a reconnu que les vases étrusques ont été cuits à 32° au plus de son pyromètre.

845. Régulateurs du feu. — On se sert souvent des dilatations des corps solides pour régler la température dans les fourneaux, les étuves, etc. Une barre métallique, disposée dans le fourneau, en prend la température et, en s'allongeant, pousse un levier qui fait tourner plus ou moins une plaque. Cette plaque ferme alors en partie le tuyau de la cheminée et diminue le tirage. D'autres fois, le levier fait fermer plus ou moins l'ouverture par laquelle l'air arrive sur le combustible, de manière, dans les deux cas, à déterminer un ralentissement dans la combustion et, par suite, un abaissement de température. Le *thermostat* du Dr Ure est fondé sur l'emploi des lames de compensation (842); la double lame est fixée par une extrémité, et l'autre, en se déplaçant par les variations de courbure que produisent les changements de température, agit sur un levier qui ferme plus ou moins des registres. Ces régulateurs sont employés dans différentes industries, par exemple pour maintenir une température constante dans les couvoirs artificiels.

La dilatation des gaz nous fournira d'autres régulateurs de la chaleur, et un pyromètre plus parfait que ceux qui dépendent de la dilatation des solides.

§ 2. — DILATATIONS DES LIQUIDES.

I. Mesure de la dilatation absolue du mercure.

846. Expériences de Dulong et Petit. — Nous avons vu que Dulong et Petit ont fait usage, dans leurs recherches sur les dilatations cubiques des solides, du coefficient de dilatation absolue du mercure. Beaucoup d'observateurs, Dalton, Cavendish, Deluc, Roy, Shuckburgh, Lavoisier et Laplace, Haellstroem, Lalande et Delisle, Casbois, ont mesuré la dilatation absolue du mercure au-dessous de 100°, soit en évaluant sa dilatation apparente dans le verre et y ajoutant celle de l'enveloppe, soit en mesurant la hauteur du

baromètre sous une même pression et à différentes températures. Mais leurs résultats diffèrent beaucoup, à cause de l'incertitude de ces différentes méthodes. Il fallait aussi opérer au-delà de 100°. C'est ce qu'ont fait Dulong et Petit en s'appuyant sur le principe suivant, dont la première idée est due à Boyle[1].

Considérons deux tubes verticaux A et B (*fig.* 625) contenant du mercure et communiquant au moyen d'un tube horizontal *c*, assez long et assez étroit pour que le liquide d'une colonne ne puisse se mêler à celui de l'autre, quand ils sont à des températures différentes. Pour que ces liquides soient en équilibre, il faut, et il suffit que les hauteurs, comptées à partir de l'axe du tube *c*, soient en raison inverse de leurs densités (I, 173). On a donc, en appelant d et d' les densités du mercure aux températures 0° et t°, et en représentant par h et h' les hauteurs des colonnes de mercure ayant ces densités, $h : h' = d' : d$. De plus, si l'on représente par v et v' les volumes d'une même masse de mercure aux températures 0° et t, et par conséquent ayant les densités d et d', on a $v : v' = d' : d$. En combinant cette proportion avec la précédente, il vient

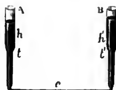


Fig. 625.

$$h : h' = v : v', \qquad \text{d'où} \qquad \frac{v'-v}{vt} = \frac{h'-h}{ht},$$

en divisant les deux membres par t. Or, $v'-v$ est l'augmentation qu'éprouve le volume v en passant de 0° à t°; $\frac{v'-v}{vt}$ est donc le coefficient de dilatation absolue du mercure. On voit qu'il suffit, pour obtenir ce coefficient, de mesurer les quantités h, h' et t, qui sont indépendantes des dimensions des vases.

Dans les cours, on montre la différence de hauteur de deux colonnes d'un même liquide portées à des températures différentes, au moyen de l'appareil de la *fig.* 626 : les deux tubes communiquants t, t' contiennent de l'alcool coloré, et sont enveloppés d'un gros tube de cristal, dans lequel on verse, d'un côté, t, de l'eau froide, et de l'autre, de l'eau bouillante. On voit alors le niveau n s'élever de plusieurs centimètres au-dessus du niveau n'.



Fig. 626. — 1/20.

L'appareil au moyen duquel Dulong et Petit ont appliqué la méthode qui précède, est représenté dans la *fig.* 627, les tubes communiquants ont la

[1] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. VII, p. 124

forme AcB (*fig.* 625); la partie supérieure des branches verticales est assez large pour qu'il n'y ait pas d'effets capillaires. Ces branches sont réunies par un tube horizontal très fin c, ayant partout le même diamètre. Ce tube s'appuie sur une barre de fer horizontale TF (*fig.* 627), en forme de T, bien dressée en dessus. Elle porte deux niveaux à bulle d'air *n*, *n'* perpendiculaires l'un à l'autre, et repose par trois pieds, sur une table munie de vis calantes. Les tubes verticaux sont soutenus par des montants en fer. Celui de la branche A qui doit être maintenue à la température de 0°, porte à sa partie supérieure un index *r* qui sert de repère pour la mesure des hauteurs. La branche A est entourée d'un cylindre de fer-blanc mastiqué sur la barre TF et

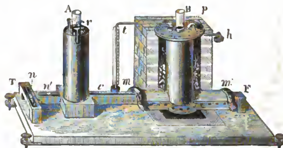


Fig. 627.

destiné à recevoir de la glace fondante; une échancrure permet d'apercevoir le niveau du mercure en écartant la glace. L'autre branche B est entourée d'un manchon en cuivre, qui porte deux prolongements horizontaux en forme de demi-cylindre *m*, *m*, au-dessous desquels est fixée, par des vis, une plaque de métal, de manière que la barre TF soit entièrement enveloppée. Du mastic placé en *m*, *m*, et appliqué sur la barre, permet de maintenir du liquide dans le manchon. Ce manchon, fermé à sa partie supérieure par une plaque fixée par des vis à un rebord assez large, est rempli totalement d'huile fixe, qu'on échauffe par le moyen d'un fourneau en briques, dont on voit la moitié dans la figure. L'excédent de l'huile, qui se dilate par la chaleur, s'écoule par le tube *h*. Le mastic *m*, *m* est en dehors du fourneau, et on l'arrose avec de l'eau pour l'empêcher de brûler ou de se séparer en séchant. La température de l'huile est donnée par un thermomètre à poids, dont le réservoir occupe toute la profondeur du bain, et par un thermomètre à air *t*, dont nous donnerons la description en traitant de la dilatation des gaz (895). Enfin, un cathétomètre, instrument imaginé par Dulong et Petit à l'occasion de ces recherches, est installé assez loin, à égale distance des tubes A et B.

Les expériences se faisaient de la manière suivante : quand la température avait atteint la limite où l'on voulait observer, on fermait toutes les issues du

fourneau, pour rendre cette température stationnaire, on observait les thermomètres, et l'on mesurait les hauteurs des colonnes au-dessus de l'axe du tube *c*. Pour cela on ajoutait ou l'on retranchait du mercure à la colonne B, de manière que le niveau s'élevât d'un demi-millimètre à peu près, au-dessus du couvercle du manchon. On mesurait ensuite, avec le cathétomètre, la distance verticale de ce niveau au repère *r*, puis, écartant la glace, on observait la distance verticale du même repère *r* au niveau de la branche A. La différence de ces deux distances donnait la quantité $h' - h$. Pour avoir h, il suffisait de connaître la distance du repère *r* à l'axe du tube *c*, distance qui était invariable, à cause de la présence de la glace fondante. Cette distance avait été relevée d'avance avec beaucoup de soin, elle était égale à $0^m,5825$; en la représentant par R, et appelant δ la distance au niveau dans le tube A, on a évidemment $h = R - \delta$. Dans une expérience faite au-dessous de 100°, on trouva $\delta = 0^m,03855$, et la distance verticale du niveau dans le tube B au repère *r*, fut $\delta' = 0^m,02875$. On a donc $h = R - \delta = 0,54395$, et $h' - h = \delta' - \delta = 0,00980$; ce qui donne, entre zéro et 100°, le nombre $\frac{1}{5550}$ pour le coefficient de dilatation absolue du mercure. Une erreur de deux ou trois dixièmes de millimètres dans la valeur de R ne produirait qu'une incertitude de deux ou trois unités dans le dénominateur. Voici les résultats trouvés par Dulong et Petit, pour moyennes d'un grand nombre d'expériences :

Température du thermomètre à air.	Dilatation moyenne absolue du mercure à partir de 0°.	Température indiquée par la dilatation du mercure supposée constante.
100°	$\frac{1}{5550} = 0,00018018$	100°
200	$\frac{1}{5425} = 0,00018433$	204,61
300	$\frac{1}{5300} = 0,00018868$	314,15

La dilatation du mercure est uniforme jusqu'à 100°, mais au-delà elle va en augmentant, quand on mesure les températures au moyen du thermomètre à air. Les nombres qui précèdent sont entachés d'une erreur provenant de ce que le nombre employé pour coefficient de dilatation de l'air était trop faible, comme nous l'expliquerons en parlant de la dilatation des gaz.

Dans les expériences très remarquables que nous venons de décrire, il reste quelques incertitudes, provenant d'abord de la couche de mercure qui dépasse le couvercle du manchon dans le vase B, et dont le refroidissement n'est pas négligeable dans les hautes températures. En outre, l'huile n'étant pas agitée, ne pouvait avoir partout la même température. Cet inconvénient était atténué par la longueur verticale des réservoirs des thermomètres, mais il ne pouvait être entièrement annulé. Enfin, les colonnes étant assez courtes, la différence de hauteur dans les deux branches était très petite, et, par suite, la moindre erreur dans la mesure de cette différence avait de l'importance.

M. Regnault, auquel nous empruntons ces remarques, a repris la question en se servant du même principe, mais au moyen d'un appareil susceptible de donner des résultats bien plus exacts [1].

847. Expériences de M. Regnault. — L'appareil de M. Regnault est représenté dans la *fig.* 628 : *a*, *a'* sont deux tubes verticaux en fer de $1^m,50$ de hauteur, et de 10^{mm} de diamètre intérieur, réunis à leur partie supérieure par un tube horizontal *αααα*, et communiquant avec l'air extérieur par deux petits tubes *t*, *t*. A leur partie inférieure, sont deux tubes horizontaux *o'oo*, *o'o*, fermés en *o'*, *o'*, et portant à l'extrémité opposée deux tubes verticaux en verre, réunis en *v* par un tuyau flexible en plomb, qui les fait communiquer avec un ballon de cuivre entouré d'eau froide V. On peut comprimer de l'air dans ce ballon, par le tube à robinet *r*, au moyen d'une pompe foulante. Le tube vertical *a'* est contenu dans une chaudière cylindrique remplie d'huile, et maintenue sur un fourneau au moyen de vis *n*, *n* ; elle est enveloppée d'un manchon en tôle, destiné à en empêcher le refroidissement. Un thermomètre à air, dont on voit une partie en AA et dont nous décrirons la disposition (907), donne la température de l'huile. L'autre tube vertical, *a*, est entouré d'un manchon dans lequel on fait passer un courant d'eau froide dont la température constante est indiquée par plusieurs thermomètres. Cette eau arrive jusqu'au fond du manchon, et s'échappe en débordant par sa partie supérieure; une portion est dirigée au moyen d'une mèche de coton ou de chanvre *c*, *c* sur les tubes horizontaux *αα*, *o'oo*, pour empêcher la chaleur de la chaudière de se propager au-delà. Enfin, des écrans doubles, qui ne sont pas représentés dans la figure, entourent cette chaudière de tous côtés, pour intercepter la chaleur qu'elle rayonne.

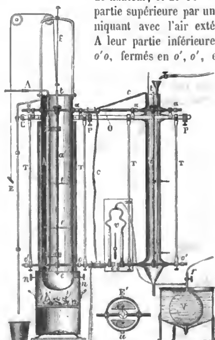


Fig. 628.

Tout l'appareil est appuyé contre un mur, et porté par une barre CPP mobile autour d'un axe C scellé dans le mur, et soutenue par deux pièces P, P, fixées aussi au mur, et munies de vis au moyen desquelles on peut la rendre bien

[1] *Mémoires de l'Académie des sciences de l'Institut*, 1847.

horizontale. Cette barre supporte le tube $\alpha\alpha\alpha\alpha$, par l'intermédiaire de quatre paliers que l'on peut monter ou descendre un peu, de manière à le rendre horizontal. On peut vérifier à chaque instant si cette condition est remplie, au moyen de repères α, α, α, α formés par de petits anneaux en laiton, sur chacun desquels est tracée une croix dont le point central est placé à la hauteur de l'axe du tube. La barre CP se contourne en un demi-cercle qui enveloppe la chaudière; un demi-cercle semblable complète l'anneau en avant. Deux vis verticales fixées à la chaudière en avant et par derrière, comme on le voit dans la coupe transversale E', appuient leur pointe sur cet anneau et servent à la supporter. Les tubes horizontaux $o'oo$, $o'o$ sont soutenus par des tirants en fer T, T, T, T, suspendus à la barre CP. Au moyen de vis disposées au bas des tirants, on rend ces tubes parfaitement horizontaux, et l'on vérifie si cette condition est remplie, au moyen de repères o', o, o, o, o'. Le tube $\alpha\alpha$ traverse la chaudière, dont les parois sont pressées par des écrous, roulant dans des vis taillées dans l'épaisseur de ce tube. Du côté du tube vertical a, le tube $\alpha\alpha$ et la barre CP traversent le manchon par des tubulures garnies de membranes de vessie. Les tubes $o'oo$,$o'o$ sont disposés de la même manière que le tube $\alpha\alpha$, dans leur passage à travers la chaudière et le manchon. Enfin, un agitateur *eeef*, dont on voit à part la projection *e'e'* dans la coupe E', sert à mêler les couches d'huile dans la chaudière. Cet agitateur est mis en mouvement au moyen d'un cordon E qui passe sur deux poulies, et sa tige *f* est guidée par son passage à travers une ouverture ménagée dans un système de supports fixés au couvercle de la chaudière. L'huile dilatée peut s'échapper par un tube latéral, qui se voit à gauche de la figure.

Voici comment se font les expériences : l'appareil étant bien réglé, on verse du mercure par les tubes t, t', et en même temps on comprime de l'air dans le ballon V, pour empêcher le mercure de monter dans les tubes de verre v. Le mercure s'étend bientôt dans le tube $\alpha\alpha$, et l'excès de ce liquide sort par un orifice O, pratiqué à sa partie supérieure. On échauffe ensuite la chaudière en agitant l'huile, pendant qu'un courant d'eau froide traverse le manchon de droite. On donne à l'air du ballon V une tension telle que le niveau du mercure ne s'élève que très peu dans celui des tubes v qui est du côté échauffé. Quand le thermomètre ne varie plus que lentement, on vérifie les repères, et quand il est stationnaire, on observe, *au cathétomètre*, les niveaux du mercure dans les tubes v, et l'on prend leur distance au repère o qui se trouve au bas du tube de verre qui est à droite, repère à partir duquel on compte toutes les hauteurs.

Supposons les tubes horizontaux infiniment minces et la colonne a, à 0°. Soit h la hauteur du mercure dans le tube v qui est à droite, et H la distance du repère qui est au bas de ce tube, à l'axe du tube $\alpha\alpha$. La force élastique de l'air du ballon V est équilibrée par la colonne de mercure H à 0°, diminuée de la colonne h, dont la température t est donnée par le thermomètre placé en v.

Cette colonne, ramenée à 0°, serait $\frac{h}{1+\delta' t}$, en appelant δ' le coefficient de dilatation absolue du mercure de 0 à $t°$. $H-\frac{h}{1+\delta' t}$ représente donc la force élastique de l'air du ballon. Soit h' la hauteur du mercure dans le tube v de gauche, au-dessus du repère du tube de droite, et h'' la différence de hauteur des deux repères voisins o, o. L'air du ballon V est tenu en équilibre par la colonne de mercure a', dont la température est T et la hauteur H', diminuée de la colonne $h'+h''$, dont la température est t. Cette dernière colonne ramenée à la température T, devient $(h'+h'')[1+\delta''(T-t)]$, δ'' étant le coefficient moyen de dilatation du mercure entre $t°$ et T°. La colonne $H'-(h'+h'')[1+\delta''(T-t)]$ représente donc la force élastique de l'air dans le ballon V. En ramenant à cette température T, la colonne du tube a qui est à 0°, on devra donc avoir

$$\left[H-\frac{h}{1+\delta' t}\right](1+\delta\,.\,T)=H'-(h'+h'')[1+\delta''(T-t)].$$

d'où $$\delta T=\frac{(H'-H)+h\,\frac{1}{1+\delta' t}-(h+h'')[1+\delta''(T-t)]}{H-\frac{h}{1+\delta' t}}. \qquad [1]$$

δ est le coefficient moyen de dilatation du mercure entre 0° et T°.

Pour calculer δT, on employait la méthode des corrections successives (I, 26) ; on prenait d'abord pour δ' et δ'' les valeurs données par Dulong et Petit, et l'on obtenait ainsi une série de valeurs de δT, que l'on renfermait dans une formule d'interpolation, pour pouvoir calculer les valeurs intermédiaires à celles qui étaient données par l'expérience. De cette formule d'interpolation, on déduisait la valeur de $\delta' t$ et celle de $\delta''(T-t)$, qui est égale à $\delta T-\delta' t$. On portait ces nouvelles valeurs dans la formule [1] et l'on calculait de nouveau δT.

L'expérience ayant montré que la glace laisse rapidement de grands vides autour du tube a (*fig.* 628), quand on veut la maintenir à 0°, M. Regnault a préféré employer un courant d'eau pour maintenir ce tube à une température constante θ. Alors la formule [1] doit être modifiée ; il faut multiplier H par $\frac{1}{1+\delta'''\theta}$, pour ramener cette colonne à ce qu'elle serait à 0°, δ''' étant le coefficient de dilatation moyen du mercure entre 0° et θ°.

M. Regnault a fait aussi un grand nombre d'expériences par une méthode un peu différente : les deux tubes a, a' étaient réunis à leur partie inférieure par un tube en fer, et le tube $\alpha\alpha$ était coupé vers le milieu, de manière à former deux tubes séparés, aux extrémités voisines desquels se trouvaient deux tubes verticaux en verre, dans lesquels le niveau du mercure se tenait à des hauteurs

différentes qu'il fallait observer. La méthode se rapproche, dans ce cas, de celle de Dulong et Petit.

Voici quelques-uns des résultats trouvés par M. Regnault :

TEMPÉRATURE du thermomètre à air.	COEFFICIENT moyen de dilatation du mercure de 0° à T.	COEFFICIENT réel de dilatation de T° à (T + 1°).	TEMPÉRATURE déduite de la dilatation absolue du mercure.	DIFFÉRENCE avec le thermomètre à air.
0°	0	0,00017905	0°	0°
30	0,00017905	18051	29,709	—0,291
50	18027	18152	49,650	—0,350
70	18078	18253	69,777	—0,223
100	18153	18305	100	0
150	18279	18657	151,044	+1,834
200	18405	18909	202,782	+2,782
250	18531	19161	255,214	+5,214
300	18658	19443	308,340	+8,340
350	18754	19666	262,160	+12,160

On voit que la dilatation du mercure est à peu près régulière jusqu'à 100°, mais que, au-delà, elle va en augmentant de plus en plus, ce qui se voit facilement dans la troisième colonne du tableau.

Pour mieux saisir la marche du phénomène, M. Regnault a employé la méthode graphique. Comme le papier est susceptible d'éprouver un retrait inégal quand il est plus ou moins humide, il a fait la construction sur une planche de cuivre à graver, formant un carré de 98 centimètres de côté. Chaque côté était divisé en 100 parties égales au moyen d'une machine à diviser, et la surface, en 10000 petits carrés égaux, par des droites passant par les points de division. Les degrés de température étaient représentés par les divisions du côté horizontal, et les *millièmes* des dilatations par les divisions verticales. Les fractions de division se déterminaient dans chaque petit carré, au moyen d'une machine à diviser que l'on posait sur la plaque, et qui restait en place pendant l'opération, son pied en plomb rendant le glissement difficile. La courbe ainsi construite tourne sa convexité vers l'axe des abcisses, ce qui montre l'accroissement de la dilatation avec la température.

II Dilatation des liquides autres que le mercure.

848. Les liquides se dilatent plus que les solides : ainsi, le mercure, le moins dilatable des liquides, se dilate plus que le zinc, qui est le plus dilatable des solides. C'est pour cela que les vases fermés et entièrement pleins de liquide se brisent quand on les échauffe, à moins que les parois ne soient assez ductiles pour s'étendre sans se déchirer.

La force avec laquelle se fait la dilatation des liquides est énorme, et égale à l'effort qu'il faudrait exercer pour ramener, par compression, la masse dilatée à son volume primitif. Or, nous savons quelle énorme compression il faut faire subir à un liquide pour réduire son volume de quelques cent-millièmes. Par exemple, le mercure se dilate de 0,0017905 de 0° à 10°, sa compressibilité est 0,00000295 pour une atmosphère; il faudrait donc exercer une pression de plus de 600 atmosphéres pour empêcher la dilatation de ce liquide, quand on l'échauffe de 10° seulement ! Il est vrai que le mercure est le moins compressible de tous les liquides, mais c'est aussi le moins dilatable.

849. Mesure de la dilatation des liquides. — Nous avons vu comment, en partant du coefficient de dilatation absolue du mercure, on peut évaluer celui d'une enveloppe de verre. Il est facile ensuite d'obtenir la dilatation absolue d'un liquide, en mesurant d'abord sa dilatation apparente dans un tube thermométrique, par la méthode que nous avons indiquée pour la dilatation apparente du mercure (699), et ajoutant ensuite à cette dilatation apparente celle du verre (833).

Deluc est un des premiers qui ait fait des expériences exactes sur la dilatation des liquides ; il employait le moyen que nous venons d'indiquer, mais sans tenir compte de la dilatation de l'enveloppe, qu'il regardait comme négligeable. Il eut soin de chasser par l'ébullition l'air dissous dans les liquides, et il constata combien il est difficile de réussir complétement[1]. Deluc a reconnu que des thermomètres faits avec les différents liquides sur lesquels il a expérimenté, étaient en retard sur le thermomètre à mercure, à partir de 0° ; et que le retard diminuait en s'approchant du point d'ébullition. D'où il conclut cette loi, confirmée depuis, que *la dilatation des liquides, pour un degré, va en augmentant à mesure que la température s'élève à partir de zéro.*

On ne peut donc plus, dans les calculs des volumes liquides, employer un coefficient; on emploie alors les dilatations totales entre 0° et les températures données t. M. Biot, en discutant les observations de Deluc, a reconnu qu'on peut représenter les dilatations des liquides qu'il a considérés, par une formule

[1] *Recherches sur les modifications de l'atmosphère*, t. I.

empirique de la forme $\delta_t = at + bt^2 + ct^3$, dans laquelle δ_t représente la dilatation totale de 0° à t°, et a, b, c des constantes que l'on détermine, pour chaque liquide, au moyen de trois observations directes. Il n'y a pas de terme constant, car on doit avoir $\delta_t = 0$ quand on fait $t = 0$. La formule servira à calculer, dans chaque cas, la valeur de δ_t dont on aura besoin. Ces formules empiriques dont nous avons déjà cité des applications (782) s'emploient toutes les fois qu'on ne trouve pas de lois simples; elles remplacent les constructions graphiques. C'est un astronome lyonnais, Gabriel Mouton, qui les a imaginées.

Gay-Lussac a mesuré la dilatation de quelques liquides, par la même méthode que Deluc, et aussi par le moyen suivant : le tube thermométrique divisé était étiré en pointe effilée et rempli de liquide à la température de 0°, puis plongé dans un bain dont la température était connue. Du liquide sortait par la pointe, on ramenait l'appareil à zéro, et l'on voyait, sur le tube gradué, combien il en était sorti. La dilatation de ce qui restait était représentée par la portion vide du tube. Cette dernière méthode permet aussi de procéder par pesées, comme dans le thermomètre à poids. Gay-Lussac a trouvé que la dilatabilité de l'*eau* est moindre que celle de l'*alcool*, puis viennent le *sulfure de carbone* et l'*éther sulfurique*, dont la dilatabilité est la plus grande. Il mesurait la contraction de ces liquides, à partir de la température de leur point d'ébullition, où la force répulsive de leurs molécules est la même, puisqu'elle fait équilibre à la pression atmosphérique.

Thomson avait remarqué que *les liquides les plus dilatables, en partant de 0°, sont ceux dont la température d'ébullition est la plus basse.* En effet, les points d'ébullition des quatre liquides observés par Gay-Lussac sont 100° ; 78,41 ; 46,60 ; 35,86. Cette loi rend bien compte de ce fait, que la dilatation d'un même liquide augmente avec la température ; car alors ce liquide se rapproche de son point d'ébullition. Le mercure est le moins dilatable des liquides, et il ne bout qu'à 360°. De plus, sa dilatation est uniforme jusqu'à 100°. Il en est de même de l'huile d'olive, qui bout à 300° ; le thermomètre fait avec ce liquide est à peu près d'accord avec le thermomètre à mercure. L'eau salée, qui bout à une température plus élevée que l'eau pure, forme un thermomètre moins irrégulier que ce liquide : à 25° du thermomètre à mercure, il marque, d'après Davy, 21°,6, tandis que le thermomètre à eau pure ne marquerait que 5°,1. Il semble donc que, plus un liquide est difficile à réduire en vapeur, plus sa dilatation est faible et plus elle est régulière, surtout quand on l'observe à une assez grande distance du point d'ébullition. Nous allons voir que cette loi n'est réellement vraie que pour les liquides appartenant au même groupe chimique.

Dans ses expériences, Gay-Lussac n'a pas tenu compte de la dilatation du verre. Muncke, qui a observé les dilatations d'un grand nombre de liquides, et particulièrement du carbure de soufre et de l'alcool absolu[1], s'est mis à l'abri

[1] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. LXIV, p. 5.

de cette cause d'erreur, par une méthode de compensation qui consiste à introduire dans le réservoir du tube thermométrique une quantité de mercure dont la dilatation soit égale à celle de l'enveloppe. Si V est le volume total de l'appareil à 0°, et v le volume du mercure, aussi à 0°, on devra avoir, pour qu'il y ait compensation, $VK = vD$, en appelant K le coefficient de dilatation cubique du verre, et D celui du mercure.

Nous réunissons ici les résultats trouvés par Dalton, pour la *dilatation totale* de divers liquides entre 0° et 100°. Il est à remarquer que certains de ces liquides bouillent naturellement au-dessous de cette température; mais quand ils sont privés d'air, ils peuvent supporter sans bouillir une température supérieure à leur point d'ébullition. Les nombres qui suivent ne sont pas corrigés de la dilatation du verre; ils représentent donc les dilatations apparentes dans cette substance :

Acide nitrique.	$\frac{1}{9} = 0,11$	Acide chlorhydrique. . . .	$\frac{1}{17} = 0,06$
Alcool.	$\frac{1}{9} = 0,11$	Acide sulfurique..	$\frac{1}{17} = 0,06$
Huiles fixes.	$\frac{1}{12} = 0,08$	Eau saturée de sel.. . . .	$\frac{1}{20} = 0,05$
Ether sulfurique.	$\frac{1}{14} = 0,07$	Eau pure..	$\frac{1}{22} = 0,0466$
Essence de térébenthine.. . .	$\frac{1}{14} = 0,07$	Mercure.	$\frac{1}{50} = 0,02$

850. Expériences de M. I. Pierre. — Le travail le plus complet qui ait été fait sur la dilatation des liquides est celui de M. I. Pierre[1]. Il a opéré sur quarante-quatre liquides différents, préparés dans un grand état de pureté. Le liquide, purgé d'air par l'ébullition, était renfermé dans un tube thermométrique dont le réservoir était soufflé sur tige. Pour l'échauffer, on ajustait le tube à liquide t (*fig.* 629), au moyen d'un bouchon i, au fond d'un manchon en verre *me* adapté à un rebord e, fixé sur le couvercle d'un réservoir R. Ce réservoir, rempli d'eau ou d'huile, était posé sur un fourneau. A côté du tube à liquide était un thermomètre t'. Un courant d'eau arrivant en c et sortant en d passait à travers le manchon et maintenait les tiges des thermomètres t, t' à une température constante donnée par deux thermomètres, l'un à mercure, l'autre formé avec le liquide dont on voulait observer la dilatation. Un double agitateur aAA' servait à mêler l'huile du réservoir R et l'eau du manchon. La température connue des tiges contenues dans ce manchon permettait de faire aux dilatations observées dans les tubes t et t', la correction relative à la moindre température de ces tiges (785). — Dans une autre série d'expériences, le tube

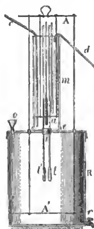


Fig. 629.

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XV, XIX, XX, XXI, XXXI, XXXIII.

à liquide était entièrement plongé dans une grande caisse en cuivre de 45 litres de capacité, remplie d'huile ou d'eau. On observait toujours les températures, comme avec l'appareil (*fig.* 629), quand elles atteignaient leur maximum en montant ou leur minimum en descendant.

La correction pour la dilatation de l'enveloppe se faisait au moyen de la formule $\Delta = D - \frac{v'}{v} k$ (833), et les valeurs comprises entre celles qui étaient données par l'observation directe étaient calculées au moyen de la formule $\delta_t = at + bt^2 + ct^3$, dans laquelle a, b, c étaient déterminés par trois observations. $\delta_t : t$ représente alors la dilatation moyenne pour 1°, entre 0° et t°. Si t est très petit, on voit que la valeur de $\delta_t : t$ devient égale à a. On obtient ainsi la dilatation pour le premier degré à partir de 0°.

On voit dans le tableau ci-dessous que la dilatation augmente avec la température, et d'une manière très différente pour les divers liquides considérés à partir de leur point d'ébullition. On remarque cependant que les liquides réunis par une accolade, qui sont ceux qui appartiennent au même groupe chimique, suivent sensiblement la même loi dans leur dilatation, c'est-à-dire que des volumes égaux à la température de l'ébullition de ces liquides, restent égaux, à d'autres températures également distantes de ce point. Ce résultat a été observé sur cinq groupes différents, mais, malheureusement, composés de deux ou trois substances seulement.

Dans chaque groupe, le liquide le plus dilatable est celui dont le point d'ébullition est le moins élevé; mais quand on passe d'un groupe à un autre, la loi remarquée par Thomson n'est plus exacte; par exemple, le chlorure de silicium, qui bout à 59°, est plus dilatable que le bromure d'éthyle, qui bout à 43°,8. De tous les liquides, le plus dilatable est l'aldéhyde, qui bout à 22°. L'éther et le chlorure d'éthyle, qui bouillent à 35° et à 11°, ont à peu près la même dilatation.

La dilatation de la plupart des liquides peut être renfermée dans une formule de la forme $\delta_t = at + bt^2 + ct^3$, avec les mêmes coefficients pour toutes les températures des expériences; d'autres, au contraire, demandent des coefficients différents, pour les dilatations dans les basses températures, et dans celles qui se rapprochent du point d'ébullition. L'eau est dans ce dernier cas.

Le tableau qui suit contient une partie des résultats publiés par M. I. Pierre :

SUBSTANCES.	COEFFICIENT MOYEN de dilatation à 0°.	au point d'ébullition	POIDS spécifiques à 0°.	TEMPÉRATURE d'ébullition.
Acétate d'oxyde d'éthyle.	0,001 258 496	0,001 489 001	0,907	74,1
— de méthyle	0,001 295 954	0,001 484 159	0,867	59,5
Alcool amylique	0,001 890 011	0,001 068 560	0,827	131,8
— éthylique	0,001 048 630	0,001 195 509	0,815	78,3
— méthylique	0,001 185 570	0,001 329 747	0,821	63,0
Bromure de méthyle	0,001 415 206	0,001 493 693	1,664	13,0
— d'éthyle	0,001 337 628	0,001 418 731	1,473	40,7
Iodure de méthyle	0,001 199 591	0,001 327 135	2,199	43,8
— d'éthyle	0,001 142 251	0,001 263 687	1,975	70,0
Butyrate d'oxyde d'éthyle.	0,001 202 792	0,001 439 571	0,902	119,0
— de méthyle	0,001 239 896	0,001 440 012	1,029	102,1
Aldehyde	0,001 653 523	0,001 827 064	0,805	22,0
Brome	0,001 038 186	0,001 167 673	3,187	63,0
Chloroforme	0,001 107 146	0,001 320 190	1,525	63,5
Chlorure d'éthyle	0,001 574 578	0,001 607 129	0,921	11,0
Chlorure de silicium	0,001 294 119	0,001 563 537	1,524	59,0
Ether sulfurique	0,001 513 245	0,001 647 354	0,736	35,5
Huile des Hollandais.	0,001 118 932	0,001 282 410	1,280	84,9
Sulfure de carbone	0,001 139 804	0,001 249 336	1,233	47,9

M. Hermann Copp a fait aussi beaucoup d'expériences sur la dilatation d'un grand nombre de liquides, entre 0° et la température de leur ébullition, par la méthode du tube thermométrique [1]. M. Frankenheim a employé la même méthode pour étudier les dilatations de plusieurs liquides ; et il a comparé ces dilatations à la cohésion aux mêmes températures, évaluée par la hauteur du liquide dans un tube capillaire [2].

851. Dilatation des liquides au-dessus du point d'ébullition. — Le grand accroissement de la dilatabilité des liquides quand on s'approche de la température de leur ébullition, a conduit à chercher quelle serait cette dilatabilité

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XLVII, p. 412.

[2] *Ann. de Pogg.*, t. LXXII, p. 422, et *Bibl. de Gen.* (arch. des sc., 1848), t. VII, p. 123.

au-delà de cette température. Thilorier avait trouvé que l'acide carbonique liquéfié par une grande compression, se dilate environ 4 fois autant que l'air, dont la dilatabilité est considérable, comme nous le verrons bientôt. Ce résultat avait paru tellement étonnant qu'on ne l'acceptait qu'avec hésitation. Depuis, M. Baudrimont a trouvé que le liquide formé en condensant le gaz provenant de la distillation de l'eau régale, se dilate à peu près comme l'air, entre —6° et 18°; et M. Ch. Drion a prouvé qu'une dilatabilité tout aussi grande se montre dans les liquides volatils, au-delà de leur point d'ébullition.

M. Drion a opéré sur l'*éther chlorhydrique*, l'*acide hypoazotique*, et l'*acide sulfureux*, liquides tellement différents par leur constitution chimique, qu'il a pu généraliser les résultats. Le liquide était renfermé dans un tube à déversement, analogue à celui du thermomètre métastatique (706). Après avoir divisé le tube en parties d'égal volume, et déterminé le rapport entre la capacité d'une division et celle du réservoir, on effilait le tube à son extrémité, on soudait autour de la pointe *b*, un réservoir *r* (*fig.* 630), et par-dessus, une olive *a* devant servir à l'introduction du liquide. Le liquide étant versé dans l'olive, pendant que tout l'appareil est dans la glace fondante, on ferme à la lampe la pointe *b*; on fait passer l'air, du réservoir R dans l'olive, en chauffant le premier, et l'on a bientôt rempli le tube. Cela fait, on ouvre l'olive, on enlève l'excès de liquide, en en laissant en *r* la quantité nécessaire pour pouvoir remplir totalement le tube, on sépare l'olive, et l'on ferme le tube en fondant le verre en *n*. De cette façon, il n'y aura pas de perte sensible de liquide, par évaporation, dans le tube, toute la vapeur nécessaire étant fournie par le liquide du réservoir *r*.



Fig. 630.

Le tube était placé à côté d'un thermomètre métastatique, dans l'axe d'une cloche renversée suspendue dans une enveloppe en tôle et chauffée par la flamme du gaz, que l'on peut régler au moyen d'un robinet, de manière à obtenir facilement une température constante donnée. Deux ouvertures garnies de feuilles de mica permettent d'observer de loin, avec des lunettes, la marche des thermomètres. Quand la température doit être au-dessous de 30°, le gaz dépose de la rosée sur la cloche, ce qui empêche de distinguer les tubes. Dans ce cas, on les suspend dans une grande masse d'eau fortement agitée.

Voici maintenant comment se font les expériences : le tube étant entièrement rempli de liquide à la température de 15°, on le plonge dans la glace fondante et l'on note la position du niveau, puis on le plonge dans de l'eau à une température *t* un peu inférieure à 15°; le niveau arrive à la partie supérieure de la graduation, et l'on note sa position. On a alors le rapport des volumes apparents

du liquide à $t°$ et à 0°, c'est-à-dire la dilatation entre ces deux températures. On porte ensuite le tube à $(t+15°)$; du liquide sort du tube et tombe dans le réservoir r, on ramène la température à $t°$, le niveau descend, et de sa position on conclut la dilatation entre $t°$ et $t'°$; et ainsi de suite.

Il résulte des expériences de M. Drion que les dilatations apparentes de l'éther chlorhydrique, de l'acide hypoazotique, et de l'acide sulfureux croissent très rapidement avec la température. Ce qui se voit facilement par le procédé graphique, en représentant les volumes par les ordonnées, et les températures par les abcisses. M. Drion a aussi représenté les volumes par deux formules empiriques de la forme $\log y = ax + bx^2 + cx^3$, des coefficients différents étant nécessaires pour représenter les résultats entre 0° et 80°, et entre 80° et 130°. A 130° la dilatation de l'éther chlorhydrique pour 1°, est égale à près de 3 fois et demie celle qui a lieu à 0°, et à 1 fois et demie celle de l'air. C'est vers 110° que la dilatation du liquide est égale à celle du gaz. Pour l'acide sulfureux, l'égalité a lieu vers 80°, et la dilatation est presque triple de celle de l'air à 130°. Les expériences sur l'acide hypoazotique n'ont été poussées que jusqu'à 90°, mais comme la dilatation de ce liquide s'accroît moins rapidement que celles de l'éther jusqu'à 50°, pour la dépasser ensuite, on peut admettre qu'à 110° il se dilate aussi, plus que l'air.

Il faut remarquer que M. Drion n'a pas eu égard à l'extension de l'enveloppe par la chaleur et par la compression produite intérieurement par les vapeurs, mais cette dilatation ne fait que diminuer la dilatation observée, de sorte que les conclusions sont vraies *à fortiori*.

Des expériences de M. d'Andréeff, faites sur l'acide sulfureux, l'ammoniaque, l'acide carbonique et le protoxyde d'azote à l'état liquide, n'ont fait que confirmer que ces liquides se dilatent autant et plus que l'air au-delà de leur point d'ébullition. Pour éviter les effets de l'extension intérieure, M. d'Andréeff opérait dans un long tube cylindrique épais et sans réservoir; quelquefois ce tube était renfermé dans un autre plus gros, contenant du même liquide, de manière que la pression était la même en dedans et en dehors du tube dans lequel on observait les volumes.

852. Relation entre la dilatabilité et la compressibilité. — M. I. Pierre n'a pu trouver de relation simple entre la dilatabilité des liquides sur lesquels il a opéré et leurs autres propriétés physiques qui sont, en général, peu connues. En comparant le peu de liquides dont on connaît à la fois la compressibilité et la dilatation, nous avons reconnu que les plus dilatables sont ceux qui se compriment le plus facilement. Remarquons d'abord que le mercure est le moins compressible et en même temps le moins dilatable des liquides, et que l'éther se dilate le plus, en même temps qu'il est le plus compressible. En plaçant par ordre de compressibilité le peu de liquides que l'on peut ainsi comparer, on a la série : *éther*, *alcool*, *essence de térébenthine*, *chloroforme*; *eau*, *mercure*; et par ordre de dilatation, on trouve : *éther*, *chloroforme*, *alcool*, *essence de térébenthine*, *eau*, *mercure*. Ces deux séries ne sont pas identiques;

mais si l'on observe que les coefficients de la plupart de ces liquides sont les coefficients moyens entre 0° et 100°, et que les différents liquides ne suivent pas la même loi dans l'accroissement de leur dilatation, on reconnaîtra que la loi se dessine avec plus de netteté qu'on ne pouvait l'espérer. Il faudrait, pour se mettre dans de bonnes conditions, comparer les contractions, à partir du point d'ébullition, aux compressibilités à cette température. Mais les données manquent complétement à ce sujet. Remarquons encore que la dilatation d'un même liquide augmente avec la température, et qu'il en est souvent de même pour la compressibilité (I, 292).

La loi dont il s'agit paraît s'étendre à tous les corps. Les solides se dilatent moins que les liquides, qui sont plus compressibles qu'eux, et ceux-ci sont beaucoup moins dilatables que les gaz, dont la compressibilité l'emporte considérablement sur celle des autres corps. Parmi les solides, les plus dilatables sont aussi ceux qui ont le plus faible coefficient d'élasticité, c'est-à-dire qui se compriment le plus facilement. Dans les deux séries suivantes, les corps sont rangés par ordre de dilatabilité et de compressibilité.

Zinc, plomb, étain, argent, or, palladium, cuivre, platine, acier, fer, verre.
Plomb, étain, or, argent, zinc, palladium, platine, cuivre, acier, fer, verre.

L'état physique, les actions mécaniques que ces corps ont eu à supporter, modifient beaucoup le coefficient d'élasticité; il n'est donc pas étonnant de trouver des différences dans les deux séries. La dilatabilité augmente avec la température; il en est de même de la compressibilité, car nous avons vu que le coefficient d'élasticité des solides diminue quand leur température s'élève. Enfin, les cristaux qui n'ont pas la même élasticité dans toutes les directions, sont aussi ceux qui se dilatent inégalement en différents sens.

Nous avons vu que la compressibilité des gaz va en augmentant quand la pression augmente, surtout chez ceux qui sont faciles à liquéfier. Nous verrons bientôt que, plus un gaz est comprimé et plus son coefficient de dilatation est grand. De plus, l'acide carbonique, qui se comprime plus que l'air, se dilate aussi davantage; ce qui confirme encore la loi que nous venons de poser.

III. Dilatation de l'eau. — Maximum de densité.

853. Maximum de densité de l'eau. — L'eau est le liquide dont on a le plus étudié la dilatation. Cela tient, non seulement à ce qu'elle est le liquide le plus répandu, mais encore à un phénomène singulier, contesté pendant longtemps, et dont la définition exacte a été l'objet d'un grand nombre de

recherches. Ce phénomène consiste en ce que l'eau à 0°, au lieu de se dilater, se contracte jusqu'à 4°. A partir de ce point, elle suit les lois ordinaires des liquides, en se dilatant de plus en plus. L'eau a donc un minimum de volume à 4°, ou un maximum de densité.

Ce phénomène a été observé d'abord par les académiciens de Florence, vers 1670 : ayant fait refroidir de l'eau dans un tube thermométrique, ils virent le niveau remonter quand la température s'approchait de 0°. Le Dr Cronne répéta cette expérience en 1683, et en conclut que l'eau se dilate par le froid, dans le voisinage de son point de congélation. Hooke objecta que ce résultat n'était qu'apparent, et qu'il était dû à une contraction plus rapide de l'enveloppe ; opinion qui fut généralement partagée.

Blagden, en 1788, ayant cru remarquer que l'eau un peu salée, qui se congèle à une température plus basse que l'eau pure, présente un maximum de contraction à une même distance de son point de congélation, admit le fait comme réel. Deluc, Rumfort, Haüy... se rangèrent à cette opinion.

Pour lever tous les doutes, il fallait opérer par un moyen indépendant de la dilatation de l'enveloppe. C'est ce que firent Trallès en Suisse, et Hope en Ecosse, en comparant les densités à 0° et un peu au-dessus. Hope remplit d'eau à 0° un vase profond portant deux thermomètres, l'un en haut et l'autre en bas. La température de l'air étant de 15°, le thermomètre inférieur monta le premier jusqu'à 4° environ, pendant que le thermomètre supérieur était encore à 0° ; d'où il conclut que l'eau vers 4° est plus dense qu'à 0°. Il fit l'expérience inverse en employant de l'eau à 10° et plongeant le vase dans de la glace ; au bout de quatre heures, le thermomètre inférieur resta stationnaire à 4°, pendant que le thermomètre supérieur continuait à baisser jusqu'à 0°. Enfin, Hope opéra encore avec l'appareil (*fig.* 631) dont on se sert habituellement dans les cours de physique, où il est connu sous le nom d'*appareil à couronne* : un bassin annulaire *c* entoure la partie moyenne d'un vase cylindrique rempli d'eau à 0° ; on verse de l'eau chaude en *c*, et le thermomètre *t'* marque bientôt 4°, pendant que le thermomètre *t* marque encore 0°. On opère aussi en remplissant le vase d'eau au-dessus de 4°, et l'on met un mélange réfrigérant dans le bassin *c*. Au bout d'un certain temps, *t'* marque 4°, et *t* marque 0°. — Rumfort a employé plus tard la disposition suivante (*fig.* 632) : un vase rempli d'eau à 0° est entouré de glace fondante ; on enfonce un corps chaud, *c*, dans cette eau, et l'on voit le thermomètre *t*, appuyé sur un morceau de liége, marquer bientôt 4°, pendant que le thermomètre *t'* se maintient à 0°. L'eau échauffée à 4° tombe donc au fond du vase, ce qui montre qu'elle est plus dense que l'eau à 0°.

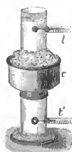


Fig. 631.

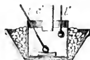


Fig. 632

Dilatation de l'eau au-dessous de zéro. — Il est possible d'amener l'eau au-dessous de zéro sans qu'elle se congèle, en prenant certaines précautions que nous indiquerons plus tard ; on remarque alors qu'elle continue à se dilater en se refroidissant, tandis que la glace aux mêmes températures se contracte (838). Blagden, en 1788, avait déjà constaté ce fait, qui a été confirmé depuis.

854. Détermination du maximum de densité. — On a fait beaucoup d'expériences pour déterminer exactement à quelle température a lieu le maximum de densité de l'eau. Deluc employait un thermomètre à eau, dont il suivait la marche pendant son refroidissement, dans le voisinage de 0°. Trallès et Hope se servaient de la méthode hydrostatique citée plus haut, et Dalton, du procédé de Rumfort. Gilpins et Blagden prenaient la densité de l'eau à différentes températures par la méthode du flacon, en ayant soin de ramener les poids de l'eau à ce qu'ils auraient été si le vase eût conservé la même capacité à toutes les températures : p étant le poids de l'eau contenue dans le flacon à la température $t°$, si le flacon avait la capacité qu'il possède à zéro, ce poids ne serait que $p : (1+Kt)$, K étant le coefficient de dilatation cubique du verre ; car les poids d'un même liquide sont proportionnels aux volumes.

Lefébre-Gineau, pour fixer la valeur du gramme, lors de l'établissement du système métrique des poids et mesures, pesait une masse de laiton dans l'eau à différentes températures, et comparait les pertes de poids, en ayant soin de les ramener à ce qu'elles auraient été si la masse n'eût pas changé de volume. Cette méthode a été suivie par Bischoff et par M. Hallstrom. Ce dernier opérait de la manière suivante [1] : il pesait dans l'air une boule creuse de verre lestée avec du sable, en ayant soin de tenir compte de la perte de poids due à l'air déplacé (I, 192). Cette boule, suspendue par un cheveu, était ensuite plongée dans l'eau à une température connue t ; la perte de poids donnait le poids de l'eau déplacée. Ce poids était ramené à ce qu'il eût été si la boule avait conservé le volume qu'elle possédait à 0°. Si p est la perte de poids, elle devient $p : 1+Kt$ après cette correction. Les pertes de poids dans l'eau à différentes températures sont alors entre elles comme les densités, et les volumes de même poids, en raison inverse de ces densités.

La dilatation du verre avait été mesurée sur des tubes fabriqués avec le même verre que celui qui avait servi à souffler les boules. Le vase qui contenait l'eau était entouré d'un bain du même liquide, dont on faisait varier la température avec de l'eau chaude ou de la neige.

M. Hallstrom a fixé le maximum de densité de l'eau à 4°,1 ; il a aussi construit des tables donnant le volume et la densité de l'eau, en prenant pour unité, le volume et la densité, soit à 0°, soit à 4°,1.

M. Despretz, dans un grand travail, publié en 1839 [2], sur les dilatations

[1] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. XXVIII, p. 56.

[2] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. LXX, p. 5, et LXXIII, p. 296.

de l'eau depuis $-9°$, jusqu'à $+100°$, a fixé à 4° le maximum de densité de ce liquide. Il a employé deux méthodes différentes. Dans la première, il a employé des tubes thermométriques, dont le coefficient de dilatation était déterminé directement en partant du coefficient de dilatation absolue du mercure. Deux de ces thermomètres à eau étaient plongés dans un vase de cuivre rempli d'eau, et alternaient avec des thermomètres à mercure, dont on vérifiait le zéro à chaque expérience. Ce vase était lui-même plongé dans un mélange réfrigérant, ou dans de l'eau plus ou moins froide. On construisait une courbe (*fig.* 633) en prenant pour abcisses les températures, et pour ordonnées des lignes proportionnelles aux nombres indiqués par les divisions des tubes à eau. La courbe diffère peu d'une parabole jusqu'à une certaine distance du maximum de densité; elle représente les variations de la dilatation apparente. Pour tenir compte des variations de volume de l'enveloppe, on prend une certaine température $od = t°$, et sur la verticale *dc*, une longueur égale à la dilatation du tube pour $t°$. La ligne *oc* donne alors les dilatations régulières du verre entre 0° et $t°$, et les dilatations absolues du liquide sont égales aux ordonnées comptées à partir de la ligne *oc*. En menant une tangente à la courbe, parallèlement à cette ligne, le point de contact fait connaître la température *oa*, pour laquelle le volume est minimum. Cette construction semble ne donner le point de contact que d'une manière incertaine ; mais comme la courbe est une parabole, dans le voisinage du point de contact cherché, on obtient ce point exactement, en menant deux cordes parallèles à *oc* et menant par le milieu de ces cordes une sécante qui coupe la courbe au point de contact cherché.

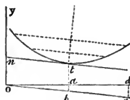


Fig. 633.

M. Despretz a aussi procédé par un calcul d'interpolation qui l'a conduit au même résultat que la méthode graphique, et il a fixé à 4° le maximum de densité de l'eau. Ce nombre est plus exact que tous ceux qui avaient été donnés jusqu'alors, tant à cause du soin apporté aux expériences, que de la manière dont il a été tenu compte des causes d'erreur ignorées ou négligées dans les expériences antérieures.

La seconde méthode employée par M. Despretz consistait à étudier l'équilibre de la température dans une colonne d'eau, dans laquelle étaient plongés quatre thermomètres à des hauteurs différentes. L'eau étant à 10°, on l'exposait à une atmosphère à 0°, et l'on construisait la courbe des températures successives de chaque thermomètre, en prenant les minutes pour abcisses, et les températures pour ordonnées.

Le thermomètre inférieur baisse d'abord, l'eau refroidie descendant au fond du vase, et reste stationnaire quand il est entouré d'eau au maximum de densité. La couche d'eau au maximum va en augmentant, et finit par s'élever

jusqu'à la surface. Le refroidissement continuant, le thermomètre inférieur recommence à baisser après être resté stationnaire ; de sorte que la courbe qui lui correspond descend d'abord vers l'axe de x, puis devient sensiblement horizontale, pour s'abaisser ensuite jusqu'à cet axe. Les autres thermomètres donnent des courbes analogues, seulement les parties horizontales se montrent plus loin de l'axe des y, l'eau au maximum ne les atteignant que plus tard, et elles s'abaissent plus tôt, parce que le refroidissement se propage de haut en bas, l'eau la plus froide étant la plus légère quand on est au-dessous du maximum de densité. S'il n'y avait pas d'irrégularités, les courbes devraient se couper sur une même parallèle à l'axe des x, dont la distance à cet axe représenterait la température du maximum de densité ; mais il n'en est pas tout à fait ainsi, et l'on prend la moyenne entre les ordonnées des différents points d'intersection. Ces expériences ont été répétées en mettant l'eau du vase à 0°, et la laissant s'échauffer dans une atmosphère à 10°.

M. Despretz a aussi construit une table donnant les volumes et les densités de l'eau de degré en degré, de —9° à 100°. Il a reconnu que la dilatation par le froid au-dessous de 4°, est un peu plus prononcée que celle qui est produite par la chaleur, au-dessus. Nous donnons une partie de cette table, dont on a souvent à faire usage dans les mesures des poids spécifiques (I, 177).

TEMPÉRATURES.	VOLUMES.	DENSITÉS.	TEMPÉRATURES.	VOLUMES.	DENSITÉS.
—9	1,0016314	0,998371	12	1,0004724	0,999527
—8	1,0013734	0,998628	13	1,0005862	0,999414
—7	1,0011354	0,998865	14	1,0007146	0,999285
—6	1,0009184	0,999082	15	1,0008751	0,999125
—5	1.0006987	0,999202	16	1,0010215	0,998979
—4	1,0005649	0,999437	17	1,0012067	0,998794
—3	1,0004222	0,996577	18	1,00139	0,998612
—2	1,0003077	0,999692	19	1,00158	0,998422
—1	1,0002138	0,999786	20	1,00179	0,998213
0	1,0001269	0,999873	21	1,00200	0,998004
1	1,0000730	0,999927	22	1,00222	0,997784
2	1,0000331	0,999966	23	1,00244	0,995566
3	1,0000083	0,999999	24	1,00271	0,997797
4	1 »	1 »	25	1,00293	0 997078
5	1,0000083	0,999999	26	1,00321	0,996800
6	1,0000309	0,999969	27	1,00345	0,996562
7	1,0000708	0,999929	28	1,00374	0,998274
8	1.0001216	0,999878	29	1,00403	0,995986
10	1,0002684	0,999731	20	1,00433	0,995688
11	1,0003598	0,999640	100	1,04315	0,958636

On doit aussi à M. Frankenheim une table des volumes de l'eau de degré en degré entre —15° et 100°, calculée au moyen de formules empiriques ne

comprenant qu'un petit nombre de degrés. D'après la formule qui donne les volumes dans le voisinage de 0°, le maximum de densité aurait lieu à 3°,86, résultat qui diffère un peu du nombre trouvé par M. Despretz.

855. Maximum de densité des dissolutions aqueuses. — Après la découverte du maximum de densité dans l'eau pure, on s'est demandé si l'eau de mer présentait la même particularité. La question a paru longtemps douteuse. M. Muncke, en 1837, a déduit de ses formules d'interpolation que l'eau de mer artificielle présente un maximum de densité, à —5°,25. Dès 1832, M. Despretz avait reconnu que l'eau de mer et les dissolutions aqueuses, ont toujours un maximum de densité, mais qu'il se manifeste au-dessous du point de congélation, dès que la proportion de substance dissoute est un peu notable. Voici le tableau des principaux résultats trouvés par M. Despretz, par la méthode du thermomètre à eau :

SUBSTANCES.	POIDS de la substance sur 997,45 d'eau.	TEMPÉRATURE du maximum de densité.	TEMPÉRATURE de la congélation du liquide agité.
Eau de mer.............	»	— 3°,67	— 1,88
Chlorure de sodium........	12,346	+ 1,19	— 0,81
Id.............	24,692	— 1,69	— 1,41
Id.............	37,039	— 4,75	— 2,12
Id.............	74,078	— 16,00	— 4,30
Chlorure de calcium.......	6,173	+ 3,24	— 0,22
Id.............	12,346	+ 2,05	— 0,53
Id.............	24,692	+ 0,06	— 1,03
Id.............	37,039	— 2,43	— 3,92
Id.............	74,078	— 10,43	— 5,28
Sulfate de potasse.........	6,173	+ 2,92	— 0,14
Id.............	12,346	+ 1,91	— 0,27
Id.............	24,692	— 0,11	— 0,55
Id.............	37,039	— 2,28	— 2,09
Id.............	74,078	— 8,37	— 4,08
Sulfate de soude	6,173	+ 2,52	— 0,17
Id.............	12,346	+ 1,15	— 0,36
Id.............	24,692	— 1,51	— 0,68
Id.............	37,039	— 4,33	— 1,30
Carbonate de potasse.......	37,039	— 3,95	— 3,21
Id.............	74,078	— 12,41	— 2,25
Carbonate de soude........	37,079	— 7,01	— 2,85
Id.............	74,078	— 17,30	— 2,20
Sulfate de cuivre..........	57,996	— 0,62	— 1,32
Potasse pure	37,39	— 5,63	— 2,10
Id	74,078	— 15,95	— 4,33
Alcool.................	74,078	+ 2,30	— 2,83
Acide sulfurique...........	12,346	+ 0,60	— 0,44
Id.............	24,692	— 1,92	— 1,09
Id.............	37,039	— 5,02	— 1,34

Les températures de congélation sont celles que l'on observe pendant qu'on agite le liquide. On voit que : 1° L'eau de mer et les dissolutions aqueuses ont un maximum de densité ; 2° la température de ce maximum baisse plus rapidement que le point de congélation ; 3° l'abaissement de la congélation au-dessous de zéro, et l'abaissement du maximum au-dessous de 4°, sont sensiblement proportionnels à la quantité de matière dissoute dans l'eau.

L'existence d'un maximum de densité dans l'eau doit être rapprochée de ce fait, que ce liquide augmente brusquement de volume en se congelant. Alors on peut se rendre compte du phénomène, en admettant que les molécules, encore dans l'état liquide, commencent déjà à prendre l'arrangement qui correspond à l'état solide, et dans lequel elles occupent plus d'espace. Cette tendance continue à se manifester de plus en plus quand l'eau reste liquide au-dessous de son point de congélation. Pour confirmer cette manière de voir, il faudrait observer les substances qui, en se solidifiant, augmentent de volume ; mais ces substances fondent à une trop haute température pour qu'il ait été possible de faire l'expérience. M. Despretz a, du moins, reconnu sur les *acides margarique* et *oléique*, la *stéarine*, l'*huile d'olive*, la *cétine*, la *parafine*, la *naphtaline* et le *soufre*, que ces substances, qui diminuent de volume en se solidifiant, ne présentent pas de maximum de densité.

256. Explication de quelques phénomènes. — Saussure a remarqué, pendant son voyage dans les Alpes, que la température du fond des lacs profonds est égale à 4° en toutes saisons. Ce fait, qui a été observé depuis dans beaucoup d'autres pays, s'explique bien, maintenant que l'on sait que l'eau à 4° est plus dense qu'à toute autre température. Dès que l'eau de la surface d'un lac a atteint cette température, elle tombe au fond, où elle ne peut s'échauffer, si la profondeur est assez grande pour que la chaleur des rayons solaires soit entièrement absorbée par les couches supérieures du liquide.

Puits de glace. — On nomme ainsi des cavités cylindriques signalées par Rumfort dans les glaciers ; au fond se trouve toujours un corps quelconque, comme un fragment de roche, une feuille sèche. On explique la formation de ces cavités de la manière suivante : le corps déposé sur la glace s'échauffe par le soleil et fait ensuite fondre la glace autour de lui. L'eau de fusion frappée par les rayons solaires passe à 4°, et descend au fond de la cavité ; là elle se refroidit en cédant sa chaleur à la glace, dont elle fond une partie, devient moins dense et remonte à la surface. Elle s'échauffe de nouveau jusqu'à 4°, retourne au fond, et ainsi de suite, de manière que la cavité devient de plus en plus profonde, jusqu'à ce qu'il se rencontre quelque fissure par laquelle l'eau puisse s'échapper ; alors le phénomène s'arrête.

§ 3. — DILATATION DES GAZ.

I. Mesure de la dilatation des gaz.

857. La dilatation des gaz est considérable, ce qui fait que, malgré leur grande compressibilité, on peut par leur dilatation briser une fiole en verre mince, ou faire crever une vessie remplie de gaz, en les échauffant convenablement. Hauksbée et Amontons sont les premiers qui aient tenté de mesurer le coefficient de dilatation de l'air. Amontons plongeait dans l'eau chaude un appareil semblable au tube de Mariotte, et il opérait sur de l'air à différentes pressions. Lahire, dans des expériences faites par le même moyen un peu modifié, reconnut, en même temps que Stancari à Bologne, que l'humidité augmente beaucoup la dilatabilité de l'air. Roy et Saussure chauffaient un ballon plein d'air, et mesuraient la pression que ce gaz acquérait à différentes températures. Prietsley fut le premier qui opéra sur des gaz différents; il les renfermait dans une espèce de thermomètre à air; un index de mercure les séparait de l'air extérieur. Monge, Berthollet et Vandermonde ont expérimenté sur l'air et sur l'hydrogène. Guyton et Prieur Duvernois renfermaient le gaz dans un ballon à 0°, puis recueillaient sur le mercure, au moyen d'un tube recourbé, le gaz qui sortait par l'effet de la dilatation. Le volume de ce gaz ramené à 0°, représentait la dilatation du volume restant. Charles annonça que les gaz insolubles dans l'eau se dilatent également. C'est alors que Gay-Lussac, à la suite d'expériences célèbres, annonça la loi de la dilatation des gaz. Il employa d'abord une méthode analogue à celle de Prieur, puis une autre plus exacte que nous allons décrire.

858. Loi de la dilatation des gaz. — On a cru longtemps, surtout après les expériences de Prietsley, Roy, Saussure et Prieur, que les gaz se dilataient inégalement. Laplace, lors de la discussion qui eut lieu à l'Institut à l'occasion des expériences de Prieur, osa prédire que les résultats devaient être inexacts, observant que les molécules des gaz n'obéissant pas sensiblement à la cohésion, des additions égales de chaleur devaient les écarter également. C'est à sa demande que Gay-Lussac entreprit ses expériences, et il annonça que, entre 0° et 100°, et sous la pression de $0^m,76$ environ, tous les gaz permanents avaient le même coefficient de dilatation. Dalton arrivait, de son côté, au même résultat. Si jusqu'alors on avait trouvé des différences dans les dilatations des divers gaz, c'est qu'on n'avait pas pris assez de précautions pour les dessécher complétement; aussi, arrivait-il qu'on trouvait des résultats différents avec un même gaz.

Expériences de Gay-Lussac. — Le gaz était contenu dans un tube thermométrique *i* (*fig.* 634), dont les divisions, d'égale capacité, étaient dans un rapport connu avec le volume du réservoir. Pour remplir ce tube de gaz bien sec, Gay-Lussac commençait par le remplir de mercure purgé par l'ébullition, comme pour faire un thermomètre ; il ajustait ensuite à la tige, un gros tube de verre *c*, rempli de fragments de chlorure de calcium. Renversant alors l'appareil verticalement, il engageait dans le tube un fil de platine, et en imprimant quelques secousses, l'air, ou le gaz, glissait à travers l'espace qui reste entre le fil de platine et le mercure, et s'introduisait dans le réservoir, après s'être desséché en traversant le chlorure de calcium. On avait soin de retirer le fil de platine pendant qu'il restait encore une petite bulle de mercure, qu'on laissait pour servir d'index. Le tube était ensuite fixé, au moyen d'un bouchon, dans une caisse remplie d'eau (*fig.* 634), placée sur un fourneau. Des thermomètres *t*, *t* donnaient la température de l'eau. On avait soin d'enfoncer le tube à gaz dans l'intérieur de la caisse, de manière que l'index fût tout près de la paroi, afin que tout le gaz fût porté à la température du bain.

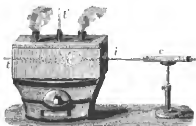


Fig. 634.

Soit v le volume occupé par le gaz quand l'eau est à 0°, et v' le volume indiqué quand il est porté à la température t. Le volume occupé réellement par le gaz est alors $v'(1+Kt)$, K étant le coefficient du verre. Soit encore h et h' les hauteurs du baromètre lorsqu'on observe les volumes v et v'. Le volume du gaz $v'(1+Kt)$, ramené à la pression h, sera $v'(1+Kt)\,h' : h$. L'augmentation de volume produite par la chaleur sera donc $v'(1+Kt)\frac{h'}{h} - v$; et l'accroissement de l'unité de volume pour 1°, c'est-à-dire le coefficient de dilatation, sera donné par la formule

$$a = \frac{v'(1+Kt)\frac{h'}{h} - v}{vt}, \qquad \text{qui se réduit à} \qquad a = \frac{v'-v}{vt},$$

si l'on néglige la correction relative à la dilatation du verre et si l'on suppose que la pression atmosphérique n'ait pas changé pendant l'expérience. Cette méthode ne peut être employée que jusqu'à 100° ; car, à une température plus élevée le mercure donne des vapeurs appréciables, qui joignent leur force élastique à celle du gaz, pour repousser l'index. — Par ce moyen, Gay-Lussac a trouvé que *les gaz se dilatent également*, qu'ils soient simples ou composés,

purs ou mélangés, et que leur coefficient de dilatation entre 0° et 100° est constant et égal à $\frac{1}{267} = \frac{3}{800} = 0{,}00375$.

Cette égalité du coefficient de dilatation des gaz constitue une des plus belles lois de la physique. Pour la vérifier, on met dans des tubes gradués reposant sur le mercure, différents gaz bien secs occupant la même longueur dans les tubes, et l'on reconnaît que le niveau du mercure se déplace également dans ces tubes, quand on les expose tous à la même température. Nous verrons bientôt que cette loi n'est pas aussi absolue qu'on l'avait cru d'abord.

859. Formules des dilatations des gaz. — Si V est le volume d'un gaz à la température de 0°, le volume V′ à la température t' sera

$$[1] \quad V' = V(1 + at'), \qquad \text{d'où} \quad V = \frac{V'}{1+at'} \quad [2]$$

pour le volume 0° en fonction du volume à t'°, en représentant par a le coefficient du gaz. Le volume V″ à t''°, en fonction du volume V′ à t'°, sera alors

$$[3] \quad V'' = V' \frac{1+at''}{1+at'}.$$

Si nous représentons par $\frac{1}{n}$ le coefficient a, on voit que, pour chaque degré de température, le volume augmente de $\frac{1}{n}$ du volume à zéro, de manière que les volumes croissent en progression arithmétique. Les formules $V' = V\left(1 + \frac{1}{n}t'\right)$, $V'' = V\left(1 + \frac{1}{n}t''\right)$ donnent $\frac{V}{n} = \frac{V'}{n+t'} = \frac{V''}{n+t''}$; ce qui montre que la n^e partie du volume à zéro peut être remplacée par la fraction $\frac{1}{n+t'}$ du volume à t'°. Nous pourrons donc écrire

$$[4] \quad V'' = V'\left(1 + \frac{t''-t'}{n+t'}\right).$$

Dalton admettait que la dilatation d'un gaz qui passe de t° à $(t+1)$° était une fraction constante *du volume* à t°; de manière que l'on aurait $V'' = V'\left(1 + \frac{t''-t'}{n}\right)$. Alors les volumes formeraient une progression géométrique dont la raison serait $\frac{n+1°}{n}$. Nous avons vu (830) que cette dernière formule et la formule [4] ne diffèrent pas l'une de l'autre, quand on néglige les puissances du coefficient. Il en est de même pour les gaz, jusqu'à 100°; mais au-delà, les deux lois donnent des résultats qui diffèrent sensiblement, et il convient d'adopter les formules [3] ou [4], puisque c'est toujours en partant de zéro qu'on mesure les coefficients de dilatation.

Variations de pression d'un gaz, par la chaleur. — Considérons un gaz dont la pression est P, à 0° : on le porte à la température t, sans que son volume change ; alors sa force élastique augmente, et il est évident que l'augmentation est celle que l'on obtiendrait si la dilatation avait d'abord pu se faire librement et qu'on eût ensuite ramené le volume à sa valeur primitive. Or, en appelant V le volume à 0°, le volume à t° est $V\left(1+\frac{t}{n}\right)$, et ce volume, ramené à la valeur V, aura une force élastique P′ donnée par la proportion

$$V : V\left(1+\frac{t}{n}\right) = P : P', \quad \text{d'où}$$

$$[5] \quad P' = P\left(1+\frac{t}{n}\right), \qquad [6] \quad P = P'\frac{n}{n+t}, \quad \text{et} \quad P'' = P'\frac{n+t''}{n+t'} \quad [7]$$

pour la pression P″ à la température t'', en fonction de la pression P′ à la température t', toujours en supposant le volume invariable.

Si le volume change, soit V′ le volume sous la pression P′ et à la température t', et V″ sa valeur quand la pression est P″ et la température t'' ; on aura $P'' = P'\frac{V'}{V''}\frac{n+t''}{n+t'}$. On a donc pour la formule la plus générale

$$[8] \qquad \frac{V''}{V'} = \frac{P'}{P''}\frac{n+t''}{n+t'}.$$

Comparabilité du thermomètre différentiel. — Comme application des formules des dilatations, nous allons montrer que les indications des thermomètres différentiels (708) sont comparables à celles du thermomètre à mercure. Considérons d'abord le thermomètre différentiel de Leslie, et supposons que les changements de volume des masses de gaz contenues de chaque côté de la colonne liquide, soient négligeables. Si les températures des boules sont t' et t'', il faudra, pour qu'il y ait équilibre, que les pressions de l'air de chaque côté satisfassent à la formule [7], qui donne $t''-t' = \frac{n+t'}{P'}(P''-P')$. Or la formule [7] donne aussi $\frac{n+t'}{P'} = \frac{n+t''}{P''}$, ce qui montre que $\frac{n+t}{P}$ est une quantité constante ; donc, $t''-t'$ est proportionnel à $P''-P'$, c'est-à-dire à la différence de niveau dans les deux branches.

Dans le cas du thermoscope de Rumfort, la force élastique reste toujours la même de chaque côté de l'index, et les volumes varient de manière que l'on ait

$$V'' : V' = n+t'' : n+t';$$

d'où l'on tire $(V''-V') : (V''+V') = (t''-t') : (2n+t''+t')$.

Or, $(V''+V')$ est constant ; c'est le volume total de l'appareil, dont on néglige les dilatations, et $t''+t'$ peut être négligé devant $2n$, qui est plus grand que 500. On voit donc que $t''-t'$ est sensiblement proportionnel à $V''-V'$, c'est-à-dire au déplacement de l'index, qui représente la différence des volumes.

860. Dilatations des gaz à de hautes températures. — Le coefficient de dilatation des gaz est constant jusqu'à 100°, quand on évalue les températures au moyen du thermomètre à mercure. Il était important de voir s'il en était ainsi au-delà de 100°. C'est ce qu'ont fait Dulong et Petit en 1815[1] : le gaz était introduit bien sec dans un gros tube effilé t (*fig.* 635), soutenu horizontalement dans une cuve remplie d'huile, disposée comme celle de la *fig.* 636, de manière que l'extrémité effilée traversât la paroi. Un thermomètre était couché à la même hauteur que le tube, et sa tige sortait au-dehors ; on avait soin de l'enfoncer avant d'observer, de manière que tout le mercure fût dans le bain. Le couvercle de la cuve soutenait, en outre, plusieurs thermomètres verticaux, et laissait passer les tiges d'agitateurs destinés à rendre la température uniforme.



Fig. 635.

Quand la cuve avait atteint à peu près la température à laquelle on voulait observer, on fermait toutes les ouvertures du fourneau, la température montait encore un peu, puis devenait stationnaire, et alors on observait les thermomètres, et l'on fermait au chalumeau la pointe effilée du tube à gaz. *Quand ce tube était refroidi*, on le disposait verticalement, la pointe enfoncée dans du mercure sec (*fig.* 635), et l'on cassait cette pointe sous le mercure. Ce liquide montait alors, et l'on mesurait sa hauteur au moyen du cathétomètre ; en même temps, on observait le baromètre. On pesait ensuite le tube avec le mercure introduit, puis le tube rempli de mercure, et enfin ce tube vide. Toutes ces opérations se faisaient dans une chambre dont la température t ne variait pas. On pouvait conclure de ces pesées, le poids P du mercure remplissant l'appareil à $t°$, et le poids p du mercure qui occuperait le même volume que le gaz à cette température. Ces poids sont entre eux comme les espaces occupés par le mercure. Soit H la hauteur du baromètre quand on ferme le tube effilé, H' cette hauteur quand on casse la pointe, et h la hauteur à laquelle s'est alors élevé le mercure dans le tube à gaz. Nous allons calculer le volume du gaz à 0° et sous la pression H, en partant successivement des volumes observés à $t°$ et à $T°$. Or, le volume à $t°$ est représenté par p, sous la pression $H-h$. Sous la pression H, et à 0°, il serait

$$[\alpha] \qquad p\frac{H-h}{H}\,\frac{1}{1+\alpha t},$$

[1] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. II, p. 240.

d'aprés la loi de Mariotte et la formule [2] (859), a étant le coefficient de dilatation du gaz au-dessous de 100°. Le gaz à la température T occupait toute la capacité du tube; or, P représentant le volume de ce tube à t°, ce volume était $P[1+K(T-t)]$ à la température T; K étant le coefficient du verre. En appelant x le coefficient moyen du gaz entre 0° et T°, le volume du gaz à 0° et à la pression H sera $P[1+K(T-t)]:(1+xT)$. En égalant cette expression du volume à 0°, à l'expression [α], il vient

$$[3] \qquad p\frac{H-h}{H}\,\frac{1}{1+at} = P\,[1+K(T-t)]:(1+xT);$$

d'où l'on tire la valeur de x.

Dulong et Petit ont d'abord opéré sur l'air au-dessous de 100°, et sont arrivés au même coefficient que Gay-Lussac; ils ont ensuite poussé les expériences jusqu'à 300° environ, et ont constaté les résultats suivants: 1° les dilatations de l'air et du gaz hydrogène sont égales entre —36° et 100° du thermomètre à mercure. Comme ces deux gaz diffèrent beaucoup par leur densité et leurs autres propriétés, Dulong et Petit ont cru pouvoir généraliser, et admettre l'identité de dilatation de tous les gaz jusqu'à 300°. Mais comme les deux gaz qu'ils ont étudiés sont de ceux qui n'ont pu être liquéfiés, on ne peut rien conclure pour les gaz qui ne sont pas dans le même cas. 2° *Le coefficient de dilatation des gaz va en diminuant à partir de* 100°, *quand la température, donnée par le thermomètre à mercure, augmente.* Il suit de là que les températures indiquées par le thermomètre à mercure sont plus élevées que celles que donnerait un thermomètre fondé sur la dilatation de l'air. En comparant ces températures, Dulong et Petit ont trouvé les résultats suivants:

Thermomètre à mercure....	100°	150°	200°	250°	300°
Thermomètre à air........	100	148,7	197,05	244,17	291,77
Différences.............	0	1,3	2,95	5,83	8,23

Pour calculer la température τ qu'indiquerait un thermomètre fondé sur la dilatation de l'air supposée constante, quand le thermomètre à mercure marque T°, on pose $1+a\tau = 1+xT$, a étant le coefficient constant de l'air, et x le coefficient moyen entre 0° et T°. On remplace ensuite $1+xT$ par cette valeur, dans l'équation [α], et elle sert alors à calculer τ. D'après les expériences qui précèdent, le coefficient de l'air serait de $\frac{1}{267}$. Si donc la température était de 267° du thermomètre à air, le volume serait double de ce qu'il est à 0°.

861. Dulong et Petit sont arrivés aux mêmes résultats, par une seconde méthode: le réservoir V renfermant l'air sec est soudé à un tube étroit l, qui descend verticalement hors du bain d'huile (*fig.* 636). Quand la température T

donnée par le thermomètre, est stationnaire, on approche une capsule c pleine de mercure sec, de manière que ce liquide y soit à la même hauteur que dans le tube l, et l'on note la hauteur H du baromètre. On laisse ensuite refroidir l'appareil jusqu'à la température t de l'air extérieur, et l'on mesure la hauteur h, à laquelle s'élève le mercure dans le tube vertical l, en ayant soin de la corriger de l'effet capillaire. On observe en même temps la hauteur H' du baromètre.

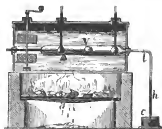


Fig. 636.

Pour conclure de ces données le coefficient moyen de dilatation de l'air entre $t°$ et T°, il faut connaître la longueur l du tube, et le rapport r de sa capacité à celle du réservoir, dont le volume est V. Cela posé, en représentant par δ et δ' les densités de l'air à $t°$ et à T° sous la pression H, le poids de l'air contenu dans l'appareil à la température de T° sera $Vr\delta + V[1+K(T-t)]\,\delta'\frac{H}{H'}$, K étant toujours le coefficient du verre, et t la température à laquelle se trouve le tube l, à partir de la paroi de la caisse. Quand l'appareil est entièrement revenu à $t°$, l'air possède la pression $H'-h$ et sa densité est $\delta\frac{H'-h}{H}$; son volume est alors $V+Vr\frac{l-h}{l}$; car l'air n'occupe dans le tube que la longueur $l-h$; son poids est donc $V\left(1+r\frac{l-h}{l}\right)\frac{H'-h}{H}\delta$, et l'on aura, en l'égalant à la première expression, et divisant tous les termes par V,

$$r\delta+[1+K(T-t)]\,\delta'\frac{H}{H'}=\left(1+r\frac{l-h}{l}\right)\delta\frac{H'-h}{H};$$

d'où l'on tirera la valeur de $\delta:\delta'$. Or, ces densités, sous la même pression H, sont en raison inverse des volumes d'une même masse d'air aux températures t et T; on a donc

$$\delta:\delta'=(1+xT):1+at, \qquad \text{ou} \qquad \delta:\delta'=1+a\tau:1+at,$$

d'où l'on tirera la valeur du coefficient moyen de dilatation x entre 0° et T° ou la valeur de la température τ du thermomètre à air, correspondante à T° du thermomètre à mercure.

Pyromètre à air. — On voit que l'appareil (*fig.* 636) constitue un véritable pyromètre à air. Il suffit, pour obtenir la température de l'enceinte dans laquelle il est plongé, de mesurer la hauteur h, et le calcul ci-dessus donnera la valeur de τ, la masse du gaz restant constante dans l'appareil. C'est un pyromètre de cette espèce que l'on voit en tm, dans la *fig.* 627.

862. NOUVELLES RECHERCHES SUR LA DILATATION DES GAZ. — Le coefficient de dilatation 0,009375, donné par Gay-Lussac, était adopté par tous les physiciens, surtout après les expériences de Dulong et Petit, lorsque le physicien suédois Rudberg annonça que ce coefficient était trop fort, et que sa valeur devait être comprise entre 0,00364 et 0,00365. Les expériences furent faites par deux procédés différents, l'un semblable à celui de Dulong et Petit (860), l'autre fondé sur la mesure des forces élastiques que prend une même masse d'air à 0° et à 100°, quand elle occupe toujours le même volume [1].

Les résultats énoncés par Rudberg ont d'abord été accueillis avec hésitation, tant on avait confiance dans les nombres adoptés par Gay-Lussac et Dulong. Cependant des expériences de MM. Pouillet, Magnus et Regnault ont prouvé que le coefficient 0,00375 est bien réellement trop fort. Indépendamment du défaut de dessiccation parfaite du gaz et surtout des parois intérieures du vase qui le contenait, M. Magnus et M. Regnault ont reconnu une cause d'erreur qui avait échappé à Gay-Lussac : l'index de mercure éprouve une certaine difficulté à se déplacer, et un peu de gaz peut passer à travers l'espace qui le sépare des parois du tube qu'il ne mouille pas ; si bien qu'il arrive souvent que cet index ne revient pas à sa position primitive, quand on ramène l'appareil à 0°. Il était donc nécessaire de reprendre l'étude de la dilatation de l'air par des méthodes plus exactes. C'est ce qu'ont fait, en 1841, M. Magnus et M. Regnault.

863. Expériences de M. Regnault. — M. Regnault dans une belle série d'expériences a établi avec une grande exactitude, au moyen de procédés variés et indépendants les uns des autres le coefficient de dilatation de l'air et de plusieurs autres gaz [2].

Première méthode. — Cette méthode est semblable à celle que Rudberg a décrite dans son premier Mémoire. L'air est contenu dans un réservoir cylindrique *a* (*fig.* 637), terminé par un tube capillaire recourbé à angle droit, à son extrémité effilée *o*. Ce réservoir est fixé par un bouchon, dans une étuve à ébullition. Pour le dessécher et le remplir d'air sec, on l'ajuste, au moyen de tubes de caoutchouc *o*, *o*, à des tubes recourbés *t*, *t*, remplis de fragments de pierre ponce imbibés d'acide sulfurique concentré, et communiquant avec une petite pompe pneumatique P. Quand l'eau est en ébullition dans l'étuve, on fait le vide dans le réservoir *a*, et l'on y laisse entrer l'air lentement, une trentaine de fois. L'air qui rentre se dessèche au contact de l'acide, et à la fin de l'opération, le réservoir est rempli d'air complétement desséché. On détache alors les tubes en caoutchouc *o*, *o*, et l'on ferme au chalumeau la pointe du tube *ao*. Le réservoir *a* est alors rempli d'air sec à la pression atmosphérique et à la température T de l'eau bouillante.

Le réservoir, après qu'il s'est refroidi, est disposé verticalement en *r* sur le support *mpp'* (*fig.* 638) ; des tiges à vis le soutiennent sur un plateau circulaire

[1] Un extrait du travail de Rudberg a été inséré dans les *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. IV, p. 6.

[2] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. IV, p. 5.

qu'il traverse, et la vis *v* achève de l'assujettir. Le pied *p* supporte une petite cuiller remplie de cire, représentée à part sur une plus grande échelle en *c*; elle peut s'élever ou s'abaisser au moyen de la tige *a*, et peut s'avancer le long du bras *b*, au moyen de la boîte A, qui glisse le long de ce bras. Le pied *p'*

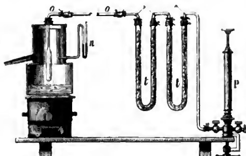


Fig. 637.

porte une pièce horizontale, qui soutient une vis verticale *o*, terminée en pointe à ses deux extrémités.

Cela posé, on soulève un vase de mercure, de manière que la pointe effilée du tube du réservoir *r* plonge de 5 à 6cm, puis on casse la pointe avec une pince, et le mercure monte dans le réservoir. Il peut arriver qu'un peu d'air s'introduise en ce moment dans l'appareil. Ce gaz passe par l'espace capillaire qui reste entre le mercure et le verre, et il est comme aspiré, quand le liquide se précipite dans le tube. Pour éviter cet inconvénient, M. Regnault garnissait la pointe effilée, de petits disques de laiton mouillés par le mercure, et versait un peu d'acide sulfurique concentré sur la surface du mercure. Après avoir brisé la pointe, on entoure le réservoir *r* de glace fondante, et quand il est parvenu à 0°, on enlève la couche d'acide sulfurique, et l'on amène la pointe inférieure de la vis *o* au niveau du mercure. On ferme ensuite la pointe, en approchant la cuiller *c*, que l'on fait glisser sur la pièce *b* jusqu'à ce que la pointe du tube s'engage dans la cire qui la remplit. On note en même temps la hauteur H du baromètre. On enlève ensuite la glace, et quand l'appareil a pris la température ambiante *t*, on mesure la hauteur du mercure

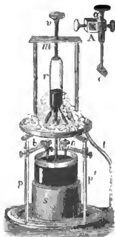


Fig. 638.

au-dessus de la cuvette. Pour cela, il suffit de relever, au cathétomètre, la distance du niveau dans le réservoir *r*, à la pointe supérieure de la vis *o*, et d'y ajouter la longueur de cette vis.

On enlève ensuite le réservoir r, et on le pèse, avec le mercure qu'il contient. On le remplit ensuite, à 0°, de mercure purgé par l'ébullition, et on le pèse de nouveau, puis on le porte dans l'appareil à ébullition (*fig.* 637), et l'on recueille le mercure qui sort, afin d'en conclure le coefficient de dilatation de l'enveloppe de verre (789).

Pour calculer le coefficient x de dilatation de l'air, soit h la hauteur, et P le poids du mercure soulevé dans l'appareil à 0°; P′ le poids du mercure qui le remplit à 0°; H la hauteur du baromètre au moment où l'on a fermé au chalumeau la pointe effilée, et H′ cette hauteur au moment où on l'a bouchée à la cire. Le volume occupé par le gaz sous la pression H et à la température de l'étuve à ébullition [1], est $(P'-P)(1+xT)\frac{H'-h}{H}$. Ce volume est aussi celui, P′, de l'appareil dilaté; on a donc

$$(P'-P)(1+xT)\frac{H'-h}{H}=P'(1+KT);$$

d'où l'on tire la valeur de x. La moyenne de quatorze expériences a donné 0,0036623, nombre plus fort que celui de Rudberg; ce que M. Regnault attribue à l'air qui peut entrer pendant qu'on brise le tube, et dont Rudberg ne fait pas mention.

864. Cette méthode a été modifiée de manière que le volume de l'air à 0° et à 100° reste à peu près le même, de sorte que l'effet de la dilatation se trouve transformé presque totalement en un changement de force élastique. L'air est alors contenu dans un ballon A (*fig.* 639), de 350 à 400 centimètres cubes de capacité, soudé à un tube terminé par une pointe effilée courbée à angle droit, et présentant un renflement cylindrique b bien régulier. Pour jauger cet appareil et déterminer sa dilatation, on le remplit de mercure au moyen d'un tube assez large e, qu'on y ajuste avec un petit tube en caoutchouc d. On verse du mercure dans le tube e; il en entre d'abord une certaine quantité dans le ballon, et pour achever de le remplir on aspire en e plusieurs fois, ou bien on met l'extrémité e en communication avec la pompe P de la *fig.* 637. On fait ensuite bouillir ce mercure, en plaçant le ballon A′, sur une grille concave, et plongeant la pointe b dans une capsule c pleine de mercure. Il faut employer une foule de précautions, et modérer le feu dès que l'ébullition commence. On enveloppe ensuite l'appareil refroidi, d'une couche épaisse de glace fondante, et quand il est parvenu à 0°, ce qui demande plusieurs heures, on le suspend, au moyen d'un petit sac, dans l'étuve à ébullition (*fig.* 637), on recueille le mercure qui sort, et l'on en conclut la dilatation de l'appareil.

[1] Cette température se déduisait de la pression atmosphérique sous laquelle avait lieu l'ébullition, par un moyen que nous indiquerons en traitant des vapeurs.

On enlève ensuite le mercure et on le remplace par de l'air sec au moyen de l'appareil (*fig.* 637), puis on opère comme dans la première méthode, et l'on prend les mêmes données. On place ensuite le ballon sur le support (*fig.* 640). on brise la pointe effilée, le mercure monte jusqu'à la moitié environ du renflement *r*, et l'on entoure de glace le ballon, ainsi que le renflement *r*, au-dessous duquel est fixée avec un bouchon, une petite capsule *c*. Quand l'appareil est à 0°, on ferme la pointe avec de la cire, au moyen de la cuiller *b*, et l'on achève l'expérience comme dans la méthode précédente; seulement, il faut corriger la hauteur *h*, de l'effet capillaire dans le renflement. La formule s'établit aussi de la même manière. Ce procédé a donné la moyenne 0,0036633, avec six appareils différents.

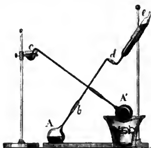


Fig. 639.

865. Seconde méthode. — Dans cette méthode, employée aussi par Rudberg, le volume du gaz reste tout-à-fait constant, et la dilatation a pour effet de changer sa force élastique. M. Regnault a opéré en employant deux dispositions différentes ; nous indiquons celle qui donne les meilleurs résultats :

Le gaz est introduit, avec les précautions indiquées précédemment, dans un ballon B (*fig.* 641), de 800 à 1,000 centimètres cubes de capacité, muni d'un tube capillaire *da*, par lequel on le met en communication, au moyen d'un caoutchouc *a*, avec le tube manométrique en siphon $\alpha\beta\gamma$, qui porte un robinet en fer à sa partie inférieure. Le ballon est fixé dans une étuve à ébullition posée sur un trépied en fer P, sous lequel est un fourneau. En *a* est une pièce de cuivre à trois branches, portant un tube *p*, par lequel on remplit le ballon B, de gaz sec, au moyen de l'appareil P*tt* (*fig.* 637), pendant que l'eau bout dans l'étuve. On dessèche par le même moyen le manomètre, et l'on y verse du mercure sec, puis on ajuste les tubes, en *a*. On fait ensuite écouler du mercure par le robinet du manomètre, jusqu'à ce que le niveau, qui est le même dans les deux branches, arrive à un repère α. On sépare alors l'appareil à dessiccation, on ferme au chalumeau l'extrémité *p*, et l'on note la hauteur H' du baromètre. On laisse ensuite refroidir le ballon, en retirant le fourneau et faisant écouler l'eau chaude par un robinet latéral (*fig.* 641); enfin, on entoure le ballon de glace fondante. En même temps, on fait sortir du mercure du manomètre par son robinet, de manière que le niveau reste en α dans la branche de gauche. Quand la température du ballon est à 0°, on mesure la distance $\alpha\beta = h$ des niveaux dans les deux branches, et l'on observe la hauteur H du baromètre. On avait évalué d'avance le rapport *r* entre le volume de l'espace $da\alpha$ et celui du ballon B; la température de cet espace est donnée par le thermomètre *t*. Le calcul se fait ensuite comme au nº 895, en évaluant la

masse du gaz, au moyen des densités ; seulement le terme $r\frac{l-h}{l}$ est remplacé par r, parce que le volume occupé par le gaz est le même à 0° et à T° [1].

866. Coefficient de dilatation de l'air. — M. Regnault a trouvé pour coefficient de dilatation de l'air sous la pression atmosphérique, le nombre 0,003665, ou $\frac{1}{273}$. M. Magnus est arrivé au même résultat [2]. Il a d'abord employé le procédé de Gay-Lussac, puis la seconde méthode de Rudberg, dans

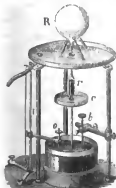


Fig. 640.

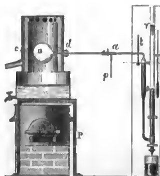


Fig. 641.

laquelle on considère les variations de force élastique. Il résulte de la valeur du coefficient de l'air, que les formules [3] et [7] du n° 893, peuvent s'écrire

$$V'' = V'\frac{273+t''}{273+t'}, \qquad P'' = P'\frac{273+t''}{273+t'}.$$

M. Babinet a remarqué que si l'on adopte pour coefficient, le nombre 0,003666, on peut le remplacer par la fraction $\frac{11}{3000}$ qui est d'un emploi très commode dans les calculs.

867. Dilatations sous des pressions variables. — La méthode du n° 889 peut servir à évaluer la dilatation des gaz sous des pressions différentes de celles de l'atmosphère [3]. Pour les pressions inférieures, on donne à la branche α du manomètre une longueur de 0m,77, et dans le cas des pressions supérieures, on donne beaucoup plus de hauteur au tube γ, et l'on remplace la pompe pneumatique P (*fig.* 637) par une pompe de compression. Il faut aussi, dans ce dernier cas, employer une disposition qui permette de fermer le

[1] Le coefficient de dilatation du ballon n'avait pu être pris directement, à cause de l'impossibilité de faire bouillir une masse de mercure aussi considérable que celle qu'il pouvait contenir. M. Regnault s'est servi du coefficient d'un ballon plus petit, formé avec du verre de même espèce.

[2] *Annales de chimie et de physique,* 2e série, t. V, p. 52.

[3] *Annales de chimie et de physique,* 3e série, t. IV, p. 330.

tube p (*fig.* 641), sans que l'intérieur du ballon communique avec l'air extérieur. Pour cela, le tube capillaire p se continue avec un tube un peu plus gros m (*fig.* 642), dans lequel on a mis quelques boulettes de mastic, et que l'on fait communiquer en P avec les tubes à dessiccation (*fig.* 637). On fait d'abord le vide plusieurs fois pour dessécher le ballon, on substitue la pompe foulante à la pompe aspirante, et quand on a comprimé suffisamment l'air, on chauffe le tube m. Le mastic fond, s'engage dans le tube capillaire t et le ferme exactement, après quoi on sépare en n l'appareil à dessiccation. On amène ensuite le niveau au point α (*fig.* 641), et l'on achève comme ci-dessus. M. Regnault a opéré par ce moyen, depuis la pression de 110^{mm} jusqu'à celle de 3655^{mm}, ou 5 atmosphères environ. Les résultats étaient corrigés de l'effet de l'extension du ballon sous l'effort de la pression intérieure. Cette extension avait été mesurée sur le ballon froid, en le remplissant d'eau, ainsi qu'une partie de son tube, et en exerçant sur cette eau une compression assez forte, au moyen d'une colonne de mercure séparée de l'eau par une colonne d'air.



Fig. 642.

M. Regnault a reconnu par ce moyen, que le coefficient de dilatation de l'air, augmente sensiblement avec la pression, comme cela se voit dans le tableau qui suit :

PRESSION à 0°.	PRESSION à 100°.	DILATATION pour 100°.	PRESSION à 0°.	PRESSION à 100°.	DILATATION pour 100°.
109^{mm},72	149^{mm},31	0,36482	760^{mm},00	»	0,36650
174,36	237,17	0,36513	1678,40	2286,09	0,36760
266,06	395,07	0,36542	2144,18	2924,04	0,36894
375,23	510,97	0,36572	3655,56	4992,09	0,37091

868. Dilatation des gaz autres que l'air. — Les différentes méthodes que nous avons décrites ont été appliquées par M. Regnault à la mesure des coefficients de dilatation de dix gaz différents. Dans ces nouvelles recherches, ce savant physicien a fait usage principalement de la méthode décrite sous le n° 864, et de celle du n° 865. Pour remplir l'appareil, après l'avoir desséché, on introduit le gaz, par la tubulure extérieure de la pompe P de l'appareil à dessiccation (*fig.* 637), on fait le vide et on laisse rentrer du gaz quatre ou cinq fois. On achève ensuite l'expérience comme pour l'air.

M. Regnault a trouvé que les coefficients de dilatation de l'*azote*, de l'*hydrogène* et de l'*oxyde de carbone*, gaz qui n'ont pu être liquéfiés, sont sensiblement égaux à celui de l'air, sous la pression atmosphérique, ou

environ[1]. L'*acide sulfureux*, l'*acide carbonique*, le *protoxyde d'azote* et le *cyanogène* donnent, dans les mêmes circonstances, un coefficient un peu plus fort, et qui va jusqu'à 0,0038453 pour l'acide sulfureux. On est porté à croire que cette plus grande dilatabilité provient de ce que, à 0°, ces gaz sont assez rapprochés de leur point de liquéfaction.

On voit donc que la loi de l'égalité du coefficient des gaz doit être restreinte à ceux qui n'ont pu être liquéfiés. Des expériences faites sur l'acide sulfureux et l'acide carbonique, ont montré aussi que leur dilatation augmente avec la pression. Il est probable qu'il en est de même des autres gaz qui ne suivent pas la loi de Mariotte.



Fig. 643.

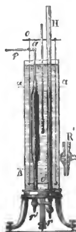


Fig. 644.

Pour mettre en évidence la différence des coefficients de dilatation de certains gaz, M. Regnault a disposé une espèce de thermomètre différentiel composé de deux ballons égaux en capacité et placés dans une même étuve à ébullition, semblable à celle de la *fig.* 641. Les tubes capillaires qui surmontent ces ballons aboutissent en B et B' (*fig.* 643) aux branches latérales d'un double manomètre B*hh'*B'. L'un des ballons étant rempli d'air, et l'autre du gaz qu'on veut lui comparer, on les entoure de glace fondante, et le mercure étant ramené à un même repère *oo*, on scelle les tubes *p* (*fig.* 641). Si l'on porte alors les deux ballons à la température de l'ébullition de l'eau, et que l'on amène le mercure au repère *o* dans le tube à air, ce liquide s'arrêtera plus bas, en β, dans l'autre tube, s'il contient un gaz qui se dilate plus que l'air.

869. Dilatation sous pression constante. — Dans toutes les expériences que nous avons décrites, la dilatation des gaz se calcule indirectement ; on la déduit de l'augmentation de force élastique que le gaz éprouve par la chaleur quand on le ramène à un volume constant, en s'appuyant sur la loi de Mariotte. Cette loi n'étant pas exacte pour la plupart des gaz, il était nécessaire de vérifier les résultats précédents, par une méthode fondée sur la variation unique des volumes des gaz, sans changement de pression. C'est ce qu'a fait M. Regnault par le procédé qui suit[2].

Le gaz est renfermé dans l'appareil (*fig.* 641), seulement le manomètre est remplacé par les tubes de la *fig.* 644. Les dimensions du tube *ar'*

[1] Les expériences sur le gaz oxygène n'ont pas donné de résultats concordants ; une petite quantité de ce gaz étant absorbée par le mercure, même dans un temps assez court.

[2] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. V, p. 68.

sont telles, que le niveau du mercure arrive à un repère α, quand le ballon est à 0°, et en β, quand il est à la température de l'ébullition, la différence de niveau étant toujours sensiblement la même dans les deux branches, ce que l'on obtient, pendant l'échauffement du gaz, en faisant écouler du mercure par le robinet r. Un second robinet r', représenté à part en R', sert à faire sortir du mercure du tube ar', pendant qu'il est séparé du tube Hr, ce que l'on fait pour jauger l'espace $a\alpha$ et la capacité $a\beta$. Une caisse rectangulaire, dont deux faces sont formées par des glaces, contient de l'eau que l'on agite au moyen du système oo'. L'expérience se fait ainsi : quand le ballon est entouré de glace fondante, on amène le mercure au niveau α dans le tube ar', le robinet r' étant placé de manière à faire communiquer les deux branches ; on ferme alors à la lampe le tube p (*fig.* 641), ou bien on fond le mastic du tube intermédiaire (*fig.* 642), si l'on opère à une pression supérieure à celle de l'atmosphère. Le ballon étant ainsi porté à la température de l'eau bouillante, on fait écouler du mercure, de manière que le niveau vienne en β, et alors la pression du gaz est sensiblement la même qu'à 0°. On mesure avec soin la petite différence qui peut exister.

Pour calculer la dilatation d'après cette expérience, soit v le volume $a\alpha$, v' le volume $a\beta$, et V la capacité du ballon. Soit encore H et H' les hauteurs du baromètre, et h et h' les différences de hauteur du mercure dans les deux branches, quand le niveau est en α, puis en β dans la branche ar'. Enfin représentons par δ, δ', δ'' les densités du gaz à 0°, T° et t°. Si nous calculons la masse du gaz renfermé dans l'appareil, en partant successivement des volumes qu'il occupe quand le ballon est à 0° et quand il est à T°, et si nous égalons ces deux valeurs, nous aurons

$$[V(1+kT)\delta' + v'\delta''](H'+h') = (V\delta + v\delta'')(H+h).$$

Or, on a $\delta' = \delta : (1+xT)$, $\delta'' = \delta : (1+xt)$.

L'égalité devient donc

$$\left(V\frac{1+kT}{1+xT} + v'\frac{1}{1+xt}\right)(H+h') = \left(V + v\frac{1}{1+xt}\right)(H+h);$$

d'où l'on tire la valeur de $1+xT$. Comme en procédant ainsi, x entre dans le second membre, on emploie la méthode des approximations successives, plutôt que de tirer x, ce qui serait plus compliqué.

Voici les résultats trouvés par M. Regnault par cette dernière méthode, et par la méthode dans laquelle la pression est variable :

GAZ.	DILATATIONS POUR 100° sous la pression de 760mm.		DILATATIONS sous de fortes pressions.	
	sous pression constante.	sous volume constant.	Dilatation pour 100° sous pression constante.	Pression à 0°.
Air.	0,3670	0,3665	0,36944	2525mm
Azote.	»	0,3668	»	»
Hydrogène.	0,3661	0,3667	0,36616	2546
Oxyde de carbone. .	0,3669	0,3667	»	»
Acide carbonique. .	0,3710	0,3688	0,38455	2522
Protoxyde d'azote. .	0,3719	0,3676	»	»
Acide sulfureux. . .	0,3903	0,3845	0,39800	983
Cyanogène.	0,3877	0,3829	»	»

870. Conclusions. — On peut conclure des recherches que nous venons d'exposer, et des résultats consignés dans le tableau ci-dessus, que :

1° Les coefficients de dilatation des gaz qui ont pu être liquéfiés diffèrent beaucoup les uns des autres ; les gaz qui n'ont pu être liquéfiés ont des coefficients sensiblement égaux sous la pression atmosphérique.

2° Le coefficient de dilatation *sous pression constante* est plus grand que celui que l'on déduit, par le calcul, des changements de force élastique que subit un même volume de gaz porté de 0° à 100° ; la différence est la plus marquée chez les gaz faciles à liquéfier, qui cèdent beaucoup plus à la compression que ne l'indique la loi de Mariotte. Ce résultat s'explique bien, puisque, dans la méthode que l'on emploie, ils sont plus comprimés à 100° qu'à 0°, d'où il résulte qu'une partie de l'effet de la dilatation est déguisée par la trop grande compressibilité. Le gaz hydrogène ne présente pas cette différence ; c'est qu'il s'écarte de la loi de Mariotte en sens inverse des autres gaz (I, 223).

3° Le coefficient de dilatation des gaz, *sauf l'hydrogène*, augmente avec la pression, et d'autant plus qu'ils s'écartent davantage de la loi de Mariotte ; de sorte que les différences entre les coefficients des divers gaz sont d'autant plus grandes que la pression est plus forte ; d'où l'on conclut que :

4° Les coefficients de dilatation des gaz diffèrent d'autant moins, que leurs pressions sont plus faibles. La loi qui s'exprime en disant que *tous les gaz ont le même coefficient de dilatation*, peut donc être considérée comme une *loi limite*, qui s'approche d'autant plus d'être exacte que les gaz sont moins comprimés, et par conséquent plus éloignés de leur point de liquéfaction. Pour les gaz qui n'ont pu être liquéfiés, et qui ne s'écartent que peu de la loi de Mariotte, on peut regarder l'égalité des dilatations comme exacte sous la pression atmosphérique. Remarquons, du reste, que les différences entre les *coefficients*, des gaz étudiés n'affectent jamais que la quatrième décimale, et de trois unités au plus ;

on peut donc dire que les coefficients de tous les gaz sont égaux à 0,0036, à moins de 3 dix-millièmes ; et l'on pourra, à moins qu'on n'ait besoin d'une excessive précision, se servir des formules des dilatations (858) en mettant à la place du coefficient, le nombre qui correspond au gaz considéré, soit sous pression constante, soit sous volume constant.

Remarque. — Une partie de la différence des coefficients pourrait être due à une couche de gaz condensée sur la surface du verre (I, 383), couche qui diminue d'épaisseur par la chaleur ainsi que par la diminution de pression, circonstances qui, comme nous l'avons vu, rendent les différences moins prononcées. L'effet de cette couche condensée a été reconnu d'une manière évidente sur le platine, par M. Pouillet. Perlet indique un moyen de reconnaître si la couche d'air condensée exerce une influence sensible dans les vases de verre : il faudrait mesurer la dilatation des gaz, dans un ballon rempli de fragments de verre, destinés à augmenter la surface qui condense le gaz, et examiner si les coefficients trouvés avec le ballon ainsi modifié sont les mêmes que ceux que l'on trouve avec les appareils ordinaires. Si la couche condensée avait une influence sur les résultats, les coefficients obtenus au moyen d'un ballon rempli de fragments de verre, seraient plus grands.

II Comparaison des thermomètres. — Pyromètre à air.

871. Nous avons vu que des thermomètres formés avec différents corps solides ou liquides, n'indiquent pas toujours le même nombre de degrés, quand on les expose à la même température. Jusqu'à 100°, l'accord existe sensiblement entre les thermomètres à air et à mercure, et les thermomètres métalliques ; mais au-delà l'écart se manifeste et va en croissant. Quelle est la substance qui donne les indications les plus exactes, c'est-à-dire s'approchant le plus d'être proportionnelles aux quantités de chaleur introduites dans l'instrument ? Telle est la question qui va nous occuper.

Dans les solides et les liquides, l'équilibre des molécules est produit par les actions combinées de deux forces, la cohésion, et la force répulsive, que la chaleur augmente pour produire la dilatation. La cohésion variant avec la distance et avec la nature des molécules, on conçoit que les quantités dont elles s'écarteront ne seront pas les mêmes, pour une même addition de chaleur, chez les différents corps, ni dans une même substance quand la température d'où l'on partira, et par suite la distance des molécules, sera différente. Dans les gaz permanents, qui suivent la loi de Mariotte presque exactement, la cohésion ne se fait sentir que très faiblement, comme l'atteste aussi l'égalité de leur coefficient de dilatation, égalité qui montre que la nature et la masse des molécules n'a plus que très peu d'influence. On est donc conduit à penser que ces gaz sont les corps les plus convenables pour mesurer les températures. Après

que Dulong et Petit eurent constaté l'égalité des coefficients de l'air et de l'hydrogène jusqu'à 300° (894), les physiciens ont même généralement admis que les indications du thermomètre à air étaient proportionnelles aux quantités de chaleur ajoutées. Ce qui les a encore confirmés dans cette opinion, c'est que les lois trouvées par Dulong et Petit dans leur remarquable travail sur le refroidissement (785) ne sont susceptibles d'énoncé simple qu'autant que les températures sont indiquées au moyen de la dilatation de l'air supposée constante. De plus, Davy avait cru reconnaître que le coefficient de l'air reste le même sous des pressions très différentes, depuis $\frac{1}{6}$ d'atmosphère jusqu'à 2 atmosphères, mais les expériences de M. Regnault (901) ont montré que les gaz sont d'autant plus dilatables qu'ils sont plus comprimés; ce qui prouve, comme l'inexactitude de la loi de Mariotte, l'influence de la cohésion; seulement cette influence est très petite pour les gaz qui n'ont pu être liquéfiés. Le gaz *hydrogène* fait exception (902); quelle que soit sa pression, il se dilate toujours également, ce qui rend très probable que sa dilatation pour 1° reste constante à toutes les températures, et qu'il donnerait un thermomètre comparable à lui-même, aux températures les plus élevées. L'air est un gaz bien plus commode à employer que l'hydrogène; si donc il arrive que deux thermomètres semblables, l'un rempli d'air, l'autre de gaz hydrogène, et gradués séparément entre 0° et 100°, marchent d'accord pour les plus hautes températures, on en pourra conclure que le *pyromètre à air* offre les mêmes avantages que le *pyromètre* à hydrogène, du moins dans les limites où la comparaison aura été faite.

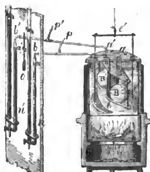


Fig. 645.

872. Comparaison des thermomètres formés avec différents gaz. — M. Regnault a procédé de la manière suivante : les deux gaz sont renfermés dans deux ballons BB' (*fig.* 645), plongés dans un même bain d'huile muni d'un agitateur *e'ee*. Chacun des ballons communique avec un manomètre *nα*, *n'α'*, au moyen d'un tube capillaire *ab*, *a'b'*. On dessèche et l'on remplit les ballons, par les petits tubes *p*, *p'*, en suivant la méthode déjà indiquée (897). Deux thermomètres à poids sont placés à côté des ballons. Ces derniers étant entourés de glace fondante, et les tubes *p*, *p'* étant fermés, on met du mercure dans les manomètres, de manière que les niveaux arrivent aux repères *α*, *α'*, et l'on note la hauteur du baromètre, ainsi que la différence de niveau dans les deux branches des manomètres. Portant ensuite les ballons à une température élevée, on verse du mercure de manière à ramener les niveaux aux repères *α*, *α'*, on consulte le baromètre, et l'on observe simultanément les quatre niveaux des tubes des manomètres, au moyen de quatre

cathétomètres placés en avant sur un support solide. Soit V le volume du ballon B à 0°, v et v' les volumes $b\alpha$ et ba, y compris l'appendice p ; t la température indiquée par le thermomètre o, et t' celle qui est donnée par un thermomètre placé entre p et p' ; H, H' les pressions que supporte le gaz à 0° et à la température τ du thermomètre à gaz ; δ la densité du gaz à 0° et sous la pression de 760^{mm}, et enfin α le coefficient de dilatation du gaz, supposé constant à toute température. La valeur de τ sera donnée par l'équation suivante, dont les deux membres représentent la masse du gaz, calculée successivement en partant de la pression à 0°, et de celle qu'on observe quand la température est τ :

$$\left(V + \frac{v}{1+\alpha t} + \frac{v'}{1+\alpha t'}\right)\delta\,\frac{H}{760} = \left(V\,\frac{1+K\tau}{1+\alpha\tau} + \frac{v}{1+\alpha t} + \frac{v'}{1+\alpha t'}\right)\delta\,\frac{H}{760}.$$

On aura pour l'autre ballon une équation semblable, et on comparera les valeurs de τ tirées de ces deux équations.

M. Regnault a trouvé ainsi, que les thermomètres à air et à gaz hydrogène sont d'accord de 0° à 325° maximum de température des expériences. Dans le protoxyde d'azote liquide, le premier marquant — 87°,67, le thermomètre à hydrogène donne — 87°,47. L'acide carbonique donne sensiblement le même résultat, mais un thermomètre rempli d'acide sulfureux est en retard sur le thermomètre à air, à partir de 100°. Le coefficient de dilatation de l'acide sulfureux va donc en diminuant quand la température indiquée par le thermomètre à air va en augmentant.

Des expériences comparatives faites sur l'air différemment condensé ont prouvé que deux thermomètres remplis d'air à des pressions initiales différentes, sont toujours d'accord. La comparaison a été faite jusqu'à 350° environ, la pression variant de 438^{mm} à 1486^{mm} dans un des ballons, pendant qu'elle était à peu près de 760^{mm} dans l'autre.

873. Pyromètre à air. — L'appareil *Babn* (*fig.* 645) constitue un pyromètre à air d'un usage plus commode que celui de Dulong et Petit (895). C'est un appareil semblable que M. Regnault a employé dans ses expériences sur la dilatation absolue du mercure (847), seulement le réservoir était formé d'un gros tube de verre, au lieu d'avoir la forme d'un ballon. Dans le cas des températures très élevées, on peut craindre que l'appareil n'augmente de capacité sous les fortes pressions qu'il supporte. Pour éviter cet inconvénient, on le remplit à 0° d'air raréfié, ce qui n'en change pas la marche, d'après ce que nous venons de voir. Quand la chaleur est assez forte pour ramollir le verre, on fait le réservoir en platine.

Il y a deux manières d'évaluer les températures au moyen de la dilatation de l'air. L'une consiste, comme nous l'avons expliqué, à observer les changements de pression de l'air sous le même volume, l'autre à observer les variations de volume sous pression constante (903). Cette dernière méthode a été imaginée

par M. Pouillet dès 1827, dans la construction de son pyromètre à air. M. Regnault préfère la première méthode, parce que, avec l'autre il ne reste qu'une faible masse d'air dans le réservoir, lors des hautes températures, de sorte qu'un nouvel accroissement n'en faisant plus sortir qu'une très petite quantité, la sensibilité de l'appareil va en diminuant.

Application. — M. Pouillet a fait, au moyen de son pyromètre à air, des expériences nombreuses pour exprimer en degrés, les températures très élevées auxquelles correspondent les divers aspects que présentent les solides, quand ils sont plus ou moins incandescents. Voici ces résultats :

Couleurs du platine.	Températures.	Couleurs du platine	Températures.
Rouge naissant.	525	Orangé foncé.	1100
Rouge sombre..	700	Orangé clair.	1200
Cerise naissant.	800	Blanc.	1300
Cerise.	900	Blanc soudant.	1400
Cerise clair..	1000	Blanc éblouissant.	1500

M. Pouillet pense qu'avec un peu d'habitude on ne se trompe pas de plus de 50° dans ces sortes d'évaluations. Dans ces expériences, le ballon en platine, était renfermé dans un moufle en fer, disposé au milieu d'un fourneau en briques. On pouvait faire varier la température, en réglant la combustion au moyen de registres convenablement disposés.

M. Pouillet a remarqué que le platine condense de l'air, qui se dégage vers 100° ; de sorte que ce n'est qu'à partir de cette température que la masse de ce gaz peut être regardée comme constante. Pour éviter cette cause d'erreur, on observe le volume du gaz à 100°, et en partant de là on calcule celui qu'il aurait à 0°, si la condensation à la surface du platine n'avait pas lieu.

874. Comparaison des thermomètres à air et à mercure. — Les tables données par Dulong et Petit, pour passer des indications du thermomètre à mercure à celles du thermomètre à air, ne sont pas exactes, puisqu'elles ont été calculées avec une valeur trop forte du coefficient de l'air. M. Regnault a construit de nouvelles tables ; il a procédé au moyen d'un appareil semblable à celui de la *fig.* 645, seulement il n'y avait qu'un seul ballon avec les thermomètres à mercure. Il a aussi fait des expériences dans les vapeurs d'essence de térébenthine et de mercure en ébullition. Ces liquides étaient mis dans des chaudières fermées en dessus, contenant les thermomètres à poids et le réservoir d'air. Les vapeurs se rendaient, par un tuyau, dans un réfrigérant où elles se condensaient. C'est dans le cours de ces expériences que M. Regnault a reconnu l'influence de la nature du verre sur les indications du thermomètre à mercure (700). Il a opéré principalement sur quatre espèces de verre. Nous donnons le tableau des résultats obtenus avec les espèces ordinairement employées en France. Ce tableau ne commence qu'à 100° ; jusque-là,

tous les thermomètres à mercure sont sensiblement d'accord avec le thermomètre à air, quel que soit le verre avec lequel ils sont construits.

TEMPÉRATURES DU THERMOMÈTRE A AIR.	TEMPÉRATURES DU THERMOMÈTRE A MERCURE.	
	Cristal de Choisy-le-Roi.	Verre ordinaire.
100°	100°	100°
120	110,05	109,98
140	140,29	139,85
160	160,52	159,74
180	180,80	179,63
200	201,25	199,70
220	221,82	219,80
240	242,55	239,90
260	263,44	260,20
280	284,48	280,52
300	305,72	301,08
320	327,25	321,80
340	349,30	343,00
350	360,50	354,00

L'influence de la nature du verre est évidente, et l'on voit que le verre ordinaire est préférable au cristal pour la construction du thermomètre à mercure. Les nombres donnés dans cette table peuvent ne pas convenir à un

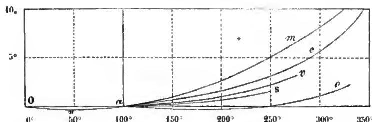


Fig. 647.

thermomètre à mercure qui serait formé avec un verre différent de ceux qui ont été employés pour la calculer. Il faut donc, autant que possible, observer directement le thermomètre à air dans les hautes températures, la dilatation du verre n'ayant pas d'influence sensible sur ses indications, car les gaz se dilatent 160 fois plus que le verre, tandis que le mercure ne se dilate que 7 fois plus. Pour rendre la comparaison des thermomètres plus facile à saisir, nous joignons ici (*fig.* 647) une construction graphique, d'après M. Regnault, dans

laquelle les abcisses représentent les températures absolues du thermomètre à air, et les ordonnées, les différences entre les indications de ce thermomètre et celles de différents thermomètres à mercure. La courbe *Onam* correspond aux températures déduites de la dilatation *absolue* du mercure, et les courbes *ac*, *av*, *as*, *ao* à celles qui sont indiquées par des thermomètres à mercure construits avec du cristal de Choisy, du verre vert, du verre de Suède, et du verre ordinaire.

M. Magnus a aussi comparé le thermomètre à mercure au thermomètre à air ; ses résultats diffèrent un peu de ceux de M. Regnault ; ce qui tient en partie à la différence de nature des verres dont ces deux physiciens ont fait usage.

III. Mesure de la densité des gaz.

875. La densité des gaz varie dans des proportions considérables quand leur température et leur pression changent. De plus, cette densité est très petite par rapport à l'eau ; aussi a-t-on coutume de rapporter les densités des gaz, non plus à l'eau mais à l'air. Il est ensuite facile d'obtenir le poids spécifique des mêmes gaz par rapport à l'eau, quand on connaît le poids spécifique de l'air par rapport à ce liquide.

Les gaz qui n'ont pu être liquéfiés obéissant à la loi de Mariotte et se dilatant également, surtout pour les variations de pression et de température de l'atmosphère, on peut définir la densité d'un gaz par rapport à l'air : *le rapport entre le poids de volumes égaux de ce gaz et d'air, sous la même pression et à la même température*, quelles que soient du reste cette pression et cette température. Il en est de même des gaz qui ont pu être liquéfiés, si l'on a soin de les comparer à l'air, à une température assez éloignée de leur point de liquéfaction, et sous une faible pression.

Mode d'expérience. — Pour mesurer la densité d'un gaz, il n'y a qu'à peser un ballon de verre à robinet, successivement vide, rempli de ce gaz, et rempli d'air. En retranchant du résultat des deux dernières pesées, celui de la première, on obtient le poids de volumes égaux de gaz et d'air, et il reste à les diviser l'un par l'autre. Cette méthode, très simple en principe, présente de nombreuses difficultés dans la pratique, à cause du faible poids des deux gaz. Il faut ramener ces poids à ce qu'ils seraient à la même température et sous la même pression. Voici comment on procède ordinairement : on visse le ballon B (*fig.* 647) sur la machine pneumatique, on fait le vide et on laisse rentrer de l'air par le robinet latéral, de manière que cet air traverse d'abord le tube T rempli de fragments de chlorure de calcium ; on répète plusieurs fois cette opération de manière à bien dessécher le ballon. On fait le vide une dernière fois, en ayant soin d'observer la hauteur *h* du mercure dans l'éprouvette de la machine pneumatique, on ferme le robinet du ballon et on le pèse. Pour

cela, on le suspend directement au fléau de la balance, après y avoir vissé un petit crochet accompagné d'une coupe c, dans laquelle on peut placer des poids. On remet ensuite le ballon sur la machine pneumatique et l'on y fait rentrer de l'air desséché, sous la pression atmosphérique H, donnée par le baromètre, puis on pèse le ballon. Soit p le poids obtenu, et π celui du ballon vide; $p-\pi$ sera le poids de l'air introduit, à la température t de l'expérience, et sous la pression H diminuée de celle, h, qui restait dans le ballon vide.

On remplit ensuite le ballon, avec le gaz dont on veut mesurer la densité. Ce gaz étant recueilli d'avance dans un gazomètre r, on fait le vide dans le ballon et on y laisse entrer du gaz par le tube t et le tube T, dans lequel il se dessèche. On répète plusieurs fois ces deux opérations de manière à enlever le peu d'air

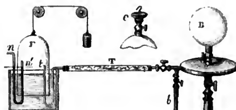


Fig. 647.

qui restait dans le ballon. On fait une dernière fois le vide, en observant la hauteur h' du mercure dans l'éprouvette, et l'on mesure le poids π' du ballon. On le remplit enfin de gaz sec, sous la pression atmosphérique H'. Un tube recourbé nn', ouvert aux deux bouts, et qui contient une colonne d'eau ou de mercure, sert à reconnaître si la pression dans le gazomètre est bien égale à celle de l'atmosphère. On prend ensuite le poids p' du ballon plein de gaz. Le poids du gaz seul $p'-\pi'$ ramené à la pression de 760^{mm} et à la température de 0°, sera, en appelant V le volume du ballon à 0°, et t' la température quand on a pesé le gaz, $(p'-\pi')\dfrac{760}{H'-h'}\cdot\dfrac{273+t'}{273}\cdot\dfrac{1}{(1+Kt')}$, K étant le coefficient de dilatation du verre, et $\frac{1}{273}$ celui du gaz. On calcule de même ce que serait le poids de l'air à la température 0° et sous la pression 760^{mm}; et, en divisant ces deux résultats l'un par l'autre, on trouve, pour la densité du gaz par rapport à l'air,

$$D=\frac{p'-\pi'}{p-\pi}\cdot\frac{H-h}{H'-h'}\cdot\frac{273+t'}{273+t}\cdot\frac{1+Kt}{1+Kt'}.$$

On voit qu'il n'est pas nécessaire de connaître la capacité du ballon.

876. Cas où le gaz attaque les métaux. — Il y a des gaz qui attaquent le cuivre des robinets, par exemple le chlore. Pour prendre la densité d'un semblable gaz, on se sert d'un flacon bouché à l'émeri, dont on a déterminé

d'avance la capacité (I, 193), ce qui suppose que l'on connait la densité de l'air par rapport à l'eau ; nous verrons plus loin comment on se procure cette donnée. On fait ensuite arriver le gaz sec par un tube qui va jusqu'au fond du flacon, droit ou renversé, suivant que le gaz est plus dense ou moins dense que l'air. Le gaz refoule l'air qui remplit le flacon, et, en en laissant perdre une certaine quantité, on est certain qu'il ne reste plus ni air ni humidité dans le flacon. On retire alors doucement le tube, pendant que le gaz continue à se dégager, et l'on ferme le flacon avec un bouchon de verre. Soit p' le poids du flacon ainsi rempli, p son poids quand il a été rempli d'air sec par le même moyen ; $p'-p$ sera la différence entre le poids du gaz et le poids d'un égal volume d'air, le poids du verre disparaissant dans la soustraction. En ajoutant à cette différence $p'-p$, le poids de l'air qui remplit le flacon, on aura le poids du gaz. Or, en appelant V la capacité du flacon à 0°, t la température et H la hauteur du baromètre au moment de l'expérience ; α la densité de l'air à 0° et sous la pression de 760mm par rapport à l'eau à 4°, le poids a de l'air contenu dans le flacon sera

$$a = V.\alpha \frac{H}{760} \frac{273}{273+t}; \quad \text{et la densité sera} \quad \frac{p'-p+a}{a}$$

877. Poids spécifique de l'air. — Pour déterminer la densité des gaz par rapport à l'eau à 4°, il suffit de la multiplier par la densité, par rapport à ce liquide, de l'air à 0° et sous la pression de 760mm. Pour déterminer ce dernier terme, on mesure comme ci-dessus le poids $A=(p-\pi)\frac{760}{H-h} \cdot \frac{273+t}{273} \frac{1}{1+Kt}$ de l'air sec qui remplit un ballon à robinet, sous la pression 760mm et à la température 0°. On pèse ensuite ce ballon rempli d'eau distillée. Soit P le poids obtenu, t' la température, et π le poids du ballon vide. Si nous représentons par δ la dilatation de l'eau, de 4° à t'°, on aura $E=(P-\pi)\frac{1+\delta}{1+Kt'}$, pour le poids de l'eau à 4° qui remplirait le ballon ayant la capacité qui correspond à la température de 0° ; alors $\frac{A}{E}$ sera le poids spécifique de l'air par rapport à l'eau. MM. Biot et Arago ont ainsi trouvé le nombre 0,0013.

On conclut de là que le poids d'un litre d'air à 0° et sous la pression de 760mm est les 13 dix-millièmes du poids d'un litre d'eau à 4°, c'est-à-dire que 1 litre d'air pèse 1gr,3.

M. Regnault a repris ces expériences, en prenant une multitude de précautions nouvelles. Il a d'abord pesé le ballon ouvert ; soit p son poids. Il y a fait ensuite bouillir un peu d'eau pour chasser tout l'air du ballon, puis il a fermé le robinet. Ayant ensuite préparé un vase plein d'eau bouillante et bien purgée d'air, il l'a mis en communication avec le ballon, au moyen d'un tube plongeant jusqu'au

fond de l'eau bouillante ; il a ouvert peu à peu le robinet, et l'eau bouillante a rempli le ballon sans se mêler à l'air. Le tube recourbé fut ensuite remplacé par un tube à boule, rempli d'eau bouillie, pour maintenir le ballon plein pendant son refroidissement et pendant qu'il était entouré de glace fondante. Quand la température du ballon eut atteint 0°, son robinet fut fermé, on le plongea dans une grande masse d'eau, pour lui faire prendre la température de la chambre, et on le pesa. En retranchant de ce poids le poids p du ballon ouvert, on obtint le poids P de l'eau qui remplissait le ballon à 0°, diminué de celui de l'air qui le remplissait à la même température. Or, le poids de l'air remplissant le ballon à 0° ayant été mesuré avec soin, en l'ajoutant à P, on eut le poids de l'eau. On calcula ensuite ce qu'eût ce poids si l'eau eût été à 4°; et le ballon renfermait autant de centimètres cubes qu'il y avait de grammes dans ce poids.

M. Regnault a trouvé ainsi 1gr,293187 pour le poids d'un litre d'air à 0° et 760mm de pression. On conclut de là, que le rapport entre les poids de volumes égaux de mercure et d'air, est 10513,5, le poids spécifique du mercure étant 13,596.

878. Expériences de MM. Dumas et Boussingault. — Dans un remarquable Mémoire sur la composition de l'air [1], MM. Dumas et Boussingault ont mesuré la densité de l'oxygène, de l'hydrogène et de l'azote, en perfectionnant beaucoup la méthode employée habituellement. Le gaz, au lieu d'être recueilli d'avance dans un gazomètre, où il se mêle avec les gaz dissous dans l'eau, était introduit dans le ballon, à mesure qu'il se produisait, et après avoir traversé des tubes en U destinés, les uns à le purifier, les autres à le dessécher. On faisait le vide et on remplissait plusieurs fois le ballon de gaz; et à la fin, le gaz qui remplissait le ballon avait exactement la pression atmosphérique, donnée par un baromètre. Le ballon était renfermé dans une cave artificielle formée d'un grand vase cylindrique en zinc à doubles parois; l'espace intermédiaire était rempli d'eau (*fig.* 648), et l'appareil se fermait avec un couvercle creux *cc*, aussi rempli d'eau. Le ballon était ainsi entouré d'une couche d'eau de 20cm d'épaisseur, dont la température était connue au moyen de plusieurs thermomètres *t*, *t'*. La température du gaz dans le ballon était donnée exactement par un thermomètre T qui y était suspendu, et dont le niveau s'observait dans le tube qui surmonte le col du ballon, ce qui est bien plus exact que de prendre la température de l'air environnant.

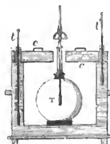


Fig. 648.

Pour peser le ballon, on le suspendait dans une armoire doublée en plomb (*fig.* 649), garnie d'une couche de chaux vive *c* pour dessécher l'air. Les portes de l'armoire étant fermées, le ballon était soustrait à tous les

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. III, p. 268.

rayonnements extérieurs, notamment à l'échauffement produit par l'approche de l'opérateur. L'armoire renfermait un thermomètre qui en donnait la température. Avant d'effectuer une pesée, on attendait que le ballon eût pris cette température, puis on l'essuyait avec soin [1].

879. Expériences de M. Regnault. — Dans la méthode perfectionnée dont nous venons de parler, il y a encore quelques incertitudes provenant de la couche d'humidité en proportion variable qui adhère extérieurement au verre, et de la perte de poids du ballon dans l'air, laquelle varie avec la pression et la température de l'atmosphère. M. Regnault évite ces incertitudes par un moyen bien simple : il fait équilibre au ballon plein de gaz, avec un autre ballon de même grosseur fabriqué avec le même verre; les deux ballons éprouvent les mêmes pertes, et M. Regnault a vu l'équilibre se maintenir pendant quinze jours, malgré les changements de température, de pression et d'humidité de l'aatmosphère.

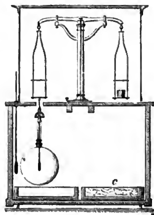


Fig. 649.

Pour éviter les corrections relatives aux dilatations, le ballon qui contient le gaz est entouré de glace fondante (*fig.* 650), on y fait le vide, on le remplit de gaz sous la pression atmosphérique, puis on le lave, on l'essuie et on le suspend à la balance dans une armoire semblable à celle de la *fig.* 649, et l'on attend, pour le peser, qu'il en ait pris la température.

Pour mesurer la pression dans le ballon, après qu'on y a fait le vide, M. Regnault se servait du *manomètre barométrique* (I, 332). *bb* (*fig.* 650) est le baromètre plongeant dans une cuvette en fonte à deux compartiments; dans l'un de ces compartiments plonge le tube *tt'* qui communique par sa partie supérieure, avec le ballon, au moyen d'un tube en plomb *ta*, qui part d'une tubulure à trois branches *a*. Le tube *m* communique avec la machine pneumatique. On mesure au cathétomètre la différence de niveau $\alpha\beta = h$, puis la hauteur H du baromètre, en se servant de la vis d'affleurement V.

Densité des gaz à 100°. — M. Regnault a aussi comparé les densités de plusieurs gaz à 100°. Pour que la monture du robinet du ballon puisse supporter

[1] MM. Dumas et Boussingault ont reconnu qu'en essuyant le ballon avec un linge sec, on le charge d'*électricité*. M. Regnault a constaté ce même résultat. Il faut attendre que cette électricité se soit dissipée, car elle apporterait des erreurs dans les pesées.

cette température, elle se compose de deux pièces A, B (*fig.* 650), réunies par des vis *v*, *v*, et entre lesquelles on a mis un bourrelet de chanvre imprégné d'un mastic gras, formé de céruse et de minium broyés avec de l'huile de lin, que la chaleur fait durcir. Le ballon est suspendu dans un grand vase en tôle galvanisée, muni d'un couvercle, et au fond duquel on fait bouillir de l'eau, dont la vapeur l'enveloppe de tous côtés. On pouvait prévoir que les gaz qui se dilatent plus que l'air auraient une densité, par rapport à ce gaz, moindre à 100° qu'à 0°; c'est, en effet, ce qui a lieu; par exemple, l'acide carbonique a pour densité 1,52910 à 0°, et 1,52418 à 100°.

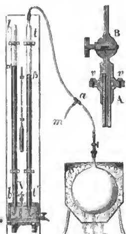


Fig. 650.

Mesure du coefficient de dilatation. — Le poids du gaz qui remplit le ballon à 100°, comparé à celui qui le remplit à 0°, peut servir à calculer le coefficient de dilatation de ce gaz : soit P le poids du gaz à 0° sous la pression $H-h$; le poids du gaz qui remplit le ballon, sous la pression H, est $P\frac{H}{H-h}$. Le poids du gaz qui reste dans le ballon, quand on le porte à la température de l'ébullition sous la pression H′ du baromètre, est $P\frac{H'}{H-h}(1+KT) : 1+\alpha T$, en appelant K le coefficient de dilatation du verre, et α celui du gaz. La diminution de poids p, donnée par l'expérience, est donc $p = P\frac{H}{H-h} - P\frac{H'}{H-h}\,\frac{1+KT}{1+\alpha T}$; d'où l'on tire la valeur de α. Cette nouvelle manière de mesurer le coefficient de dilatation, permet d'opérer sur les gaz qui attaquent le mercure.

Vérification de la loi de Mariotte. — En observant le poids d'un gaz à 0° ou à 100°, et sous diverses pressions, on peut encore vérifier si les nombres obtenus satisfont à la loi de Mariotte à ces deux températures. M. Regnault a reconnu ainsi, que l'acide carbonique, qui s'écarte notablement de la loi de Mariotte à 0°, la suit sensiblement à 100°, sous des pressions plus faibles que celle de l'atmosphère; ce qui confirme les résultats obtenus par une autre méthode (I, 323). Par exemple, à 0°, il a donné les densités 1,52910, 1,52366, 1,52146, sous les pressions 760, 374 et 224 millimètres.

Voici les densités trouvées par M. Regnault:

GAZ.	DENSITÉ.	POIDS D'UN LITRE DE GAZ à 0° et à 760mm.
Air.	1	1gr,293187
Azote.	0,97137	1,256167
Oxygène	1,10563	1,429802
Hydrogène.	0,06926	0,089578
Acide carbonique.	1,52901	1,977414

880. Applications des densités des gaz. — C'est principalement en chimie qu'on se sert des densités relatives des gaz. Gay-Lussac a découvert que *lorsque deux gaz se combinent, les volumes qui s'unissent sont toujours dans des rapports simples*, c'est-à-dire, dont les deux termes sont des nombres entiers très petits. Par exemple, 1 volume d'oxygène s'unit à 2 volumes de gaz hydrogène pour former de l'eau ; 1 volume de chlore doit se combiner avec 1 volume d'hydrogène pour former de l'acide chlorhydrique. De plus, le composé formé, considéré à l'état de gaz ou de vapeur, possède, à la même température et sous la même pression, un volume qui est aussi dans un rapport très simple avec les deux volumes qui se sont combinés ; ainsi, 1 volume d'oxygène et 2 d'hydrogène donnent 2 volumes de vapeur d'eau ; 1 volume de chlore et 1 volume d'hydrogène donnent 2 volumes d'acide chlorhydrique. Il résulte de là que, si nous appelons v et v' les volumes qui se combinent, V le volume du gaz formé, et d, d', D les densités des trois gaz considérés, les poids ne changeant pas pendant la combinaison, nous aurons $vd+v'd'=VD$, relation qui servira à calculer l'une des trois quantités d, d', D, si l'on connaît les deux autres ainsi que les rapports simples qui existent entre les volumes v, v', V. Elle pourra servir aussi à trouver le rapport $V:v$, si l'on connaît les densités des trois gaz, et le rapport $v':v$; on trouvera toujours des nombres simples, pour les deux termes de ces rapports. Ce dernier calcul est important, dans le cas où le composé n'est pas un gaz à la température ordinaire ; alors on calcule le volume V, pour une température telle que le composé soit à l'état de vapeur, en prenant la densité de cette vapeur, par un moyen que nous indiquerons plus tard, et considérant les volumes v, v' et les densités d et d' à cette même température, ce qui suppose que les densités relatives des gaz ne changent pas avec la température, ce qui malheureusement n'a pas toujours lieu (913).

Un autre usage important des densités des gaz est celui qu'on en fait pour calculer le *poids atomique* des corps simples. On nomme ainsi le rapport entre le poids de l'atome d'un corps simple et le poids de l'atome d'oxygène, pris pour terme de comparaison et représenté par 100. Pour calculer les poids atomiques, on part de cette hypothèse, appuyée sur un grand nombre de

considérations et sur quelques données physiques que nous ferons connaître en traitant des chaleurs spécifiques : *sous la même pression et à la même température, tous les gaz simples contiennent le même nombre d'atomes*. Il résulte de là, que les poids des atomes des gaz simples sont entre eux comme les *densités* de ces gaz. On obtiendra donc le poids de l'atome d'un gaz, comparé au poids 100 de l'atome d'oxygène, par une simple proportion. Par exemple, la densité de l'oxygène par rapport à l'air est 1,1056 ; celle du gaz hydrogène est 0,0692 ; on aura $1,1056 : 0,0692 = 100 : x$, relation qui donne $x = 6,25$, pour la valeur du poids atomique de l'hydrogène. Quand les corps simples ne sont pas gazeux, on compare la densité de leur vapeur à la densité de l'oxygène à la même température ; ce qui suppose que le coefficient de dilatation de ce gaz reste constant jusqu'à cette température.

Les volumes des gaz qui se combinent étant connus, on en conclut que les nombres d'atomes qui s'associent pour former l'atome composé, sont entre eux comme les volumes qui s'unissent. Ainsi, un atome d'eau est formé de 1 atome d'oxygène et de 2 atomes d'hydrogène, et le poids atomique de l'atome composé est égal à la somme des poids atomiques des atomes qui le composent, c'est-à-dire ici, à $100 + 2 . 6,25 = 112,50$. Cet usage des densités des gaz explique pourquoi on a fait tant d'efforts pour perfectionner les méthodes destinées à les mesurer.

Nous joignons ici le tableau des densités d'un certain nombre de gaz comparées à celles que donnent les formules chimiques. Ces nombres, obtenus par la méthode que nous avons décrite en premier lieu, sont loin d'être aussi exacts que ceux qui sont contenus dans le tableau précédent.

GAZ.	DENSITÉ observée.	DENSITÉ calculée.	POIDS d'un litre à 0° et à 760mm.	OBSERVATEURS.
Ammoniaque..........	0,5967	0,5940	0gr,7752	Biot et Arago.
Acide iodhydrique......	4,4288	4,3399	5,7749	Gay-Lussac.
— fluosilicique......	3,5735	»	4,6423	J. Davy.
— fluoborique......	2,3709	»	3,0800	Id.
— chloroxycarbonique	»	3,3990	4,4456	Id.
— sulfureux.......	2.2340	»	2,8848	Thénard.
— sulfhydrique.....	1,1912	»	1,5475	Thén. et Gay-Lussac.
— chlorhydrique....	1,2474	»	1,6205	Biot et Arago.
Chlore..............	2,4700	2,4260	3,2088	Thén. et Gay-Lussac.
Cyanogène...........	1,8064	1,8044	2,3467	Gay-Lussac.
Protoxyde d'azote.....	1,5204	1,5270	1,9752	Colin
Bioxyde d'azote........	1,0388	1,0364	1,3495	Bérard.
Gaz oléfiant..........	0,9780	0,9816	1,2752	T. de Saussure.
Protocarbure d'hydrogène.	0,5550	0.5596	0,7270	Thomson.
Arséniure d'hydrogène...	0,6950	2,6950	3,5020	Dumas.
Protophosphure d'hydrog.	1,214	»	1,5660	Id.
Oxyde de carbone......	0,9569	0,9678	1,2431	Cruikshanks.

IV. Applications de la dilatation de l'air.

881. Thermo-baromètre. — Un thermomètre à air, ouvert à sa partie supérieure et maintenu à une température constante, pourrait servir à mesurer les variations de la pression atmosphérique. En effet, v étant le volume occupé par le gaz sous la pression de 760^{mm}, r le rayon du tube dans lequel se meut l'index, et h la quantité dont cet index s'éloigne de la position qui correspond à la pression de 760^{mm}; pour une différence de pression x, on aura, d'après la loi de Mariotte, $v \pm \pi r^2 h : v = 760 : 760 \mp x$; d'où l'on tirera $760 \pm x = \frac{760 \cdot v}{v \mp \pi r^2 h}$. Le signe supérieur correspond au cas où la pression dépasse 760^{mm}. On peut aussi tirer de cette équation la valeur à donner au volume v pour que h soit égal à n millimètres quand x est égal à 1, c'est-à-dire pour que l'instrument soit n fois plus sensible que le baromètre ordinaire.

Comme la température varie, ce qui fait aussi marcher l'index, il faut tenir compte de cette circonstance. Pour cela on gradue d'abord le tube à air, en le maintenant à la température de 0°, et le portant successivement à 760^{mm} et à $760 + h$. On marque les points où s'arrête l'index, et l'on divise l'intervalle en autant de parties égales qu'il y a de millimètres dans h [1]. La division est tracée sur une plaque, mobile le long du tube, et l'on marque sur ce tube un point de repère, au n° 760. On pourra établir de la même manière une graduation pour toute autre température constante, seulement le n° 760 ne correspondra pas au même point du tube, et les divisions seront d'autant plus grandes que le volume de l'air à 760^{mm} sera plus grand, c'est-à-dire, que la température sera plus élevée. Il y aura donc une échelle particulière pour chaque température, et si cette température restait constante, il n'y aurait rien autre chose à faire qu'à lire le numéro de son échelle, qui se trouve en face l'index. Mais si la température varie d'une observation à l'autre, il faudra évidemment, pour rendre ces observations comparables à celles qui sont faites à 0°, diminuer les résultats observés à t° de la quantité dont s'est déplacé l'index par l'effet de la dilatation seule; ce qui revient à descendre l'échelle qui correspond à t°, de manière que son n° 760 se trouve placé au même endroit que le n° 760 de l'échelle qui correspond à 0°, c'est-à-dire au repère marqué sur le tube. Alors le numéro de l'échelle établie pour la température t, qui se trouve en face de l'index, donne la pression cherchée. Un thermomètre ordinaire indique la température t.

[1] Cette graduation n'est qu'approchée; car la formule qui précède montre que h n'est pas proportionnel à x: aussi convient-il de chercher séparément la longueur des divisions au-dessus et au-dessous de 760; les dernières seront un peu plus petites que les autres.

Sympiézomètre. — La première idée du thermo-baromètre est due à Amontons et à Boyle. En 1844, M. Bodeur a fait connaître un thermo-baromètre d'un usage commode. Cet instrument a été ensuite perfectionné par MM. Adie, d'Edimbourg, Bunsen, Silbermann, Gaulin. La *fig.* 592 représente l'appareil de M. Bunsen, qui lui a donné le nom de *sympiézomètre*.

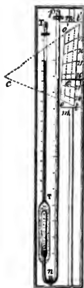


Fig. 651.

T est un thermomètre à alcool, dans le réservoir duquel se trouve renfermé le réservoir *a* du thermomètre à air *anp*, de manière que l'air logé en *a* possède toujours la même température que le thermomètre à alcool. Le tube du thermomètre à air et une partie de son réservoir contiennent de l'huile d'amandes douces colorée, liquide léger et peu volatil. La pression atmosphérique se fait sentir en *p*.

Pour établir la graduation, on construit deux échelles *oo'*, *tt'* correspondant à deux températures 0° et *t*°, en portant l'appareil à deux pressions, 760^{mm} et 760$^{mm} \pm h$. Ces deux échelles sont tracées parallèlement l'une à l'autre sur une plaque mobile *mm*. On mène ensuite les lignes *ot*, *o't'*, et en joignant les points de division de l'échelle *tt'* au point de rencontre c, on obtient sur des parallèles à *tt'* équidistantes, et en nombre égal au nombre de degrés qu'il y a entre 0° et *t*°, les échelles correspondantes aux températures comprises entre ces deux-là. On peut, de même, établir des échelles parallèles correspondantes à des températures au-dessous de 0° et au-dessus de *t*°. En tête de chaque échelle est inscrite la température à laquelle elle correspond. — Supposons que l'on veuille, avec cet instrument, trouver la pression quand la température est de 10°. On fera glisser la plaque *mn* de manière à placer le n° 760 de l'échelle qui correspond à 10°, en face du repère que l'on a marqué auprès du n° 760 de l'échelle qui correspond à 0° ; on amènera la pointe de l'aiguille horizontale *e* au sommet de la colonne d'huile, et la division de l'échelle correspondant à 10° qui coïncidera avec l'aiguille, donnera la pression cherchée.

Le sympiézomètre peut ainsi remplacer le baromètre ; ses petites dimensions le rendent très portatif et d'un usage précieux en mer, où le baromètre ordinaire est souvent difficile à observer ; de plus, il est très sensible.

882. Mouvements produits par la dilatation des gaz. — C'est à la diminution de densité que la chaleur fait éprouver à l'air, qu'est due la force ascensionnelle des mongolfiéres. L'air se renouvelle autour des corps qui brûlent, par un effet analogue : les gaz échauffés et très dilatés, provenant de la combustion, s'élèvent en vertu de leur légèreté spécifique, et sont remplacés par l'air environnant, dont une partie active la combustion, se dilate, ou est remplacée par des gaz très dilatés, qui montent à leur tour. La

fumée qui s'élève au-dessus du bois qui brûle n'est autre chose qu'un mélange de gaz très dilatés, de vapeurs diverses et de poussière de charbon.

Dans l'antiquité, le foyer où l'on entretenait le feu était situé au milieu de la chambre, et la fumée sortait par une ouverture pratiquée au toit. Il en est encore ainsi dans certains pays du nouveau continent et même de l'Europe. Plus tard, le foyer fut placé contre le mur, et la fumée, reçue dans une vaste hotte, s'élevait à travers un large conduit vertical. Vers le XV[e] siècle, on s'occupa de perfectionner ce système, et l'on y ajouta le chambranle, destiné à rétrécir l'ouverture. Alors l'écoulement de la fumée à travers le conduit n'est plus dû seulement à son ascension verticale, car elle peut suivre un canal oblique, et même marcher de haut en bas; mais il est dû à un effet particulier, qu'on appelle le *tirage*.

Tirage des cheminées. — Si nous supposons le conduit de la cheminée rempli de gaz chauds, cette colonne de gaz tendra à s'élever, d'après le principe d'Archimède, avec une force égale à la différence D entre son poids et le poids d'un volume égal de l'air froid extérieur. Il se produira alors à la partie intérieure du conduit une véritable aspiration (*fig.* 652), semblable à celle qui aurait lieu si la colonne de gaz chaud était remplacée par un piston, sollicité de bas en haut par une force égale à D. Cette force augmente avec le volume de la colonne de gaz. Pour avoir un fort tirage, il faut donc donner à cette colonne, une grande hauteur et une grande section. Il faut, de plus, que le gaz ne puisse se refroidir que le moins possible, et enfin qu'il entre à une haute température; par conséquent que tout l'air qui afflue passe à travers le feu, pour en activer la combustion et s'y échauffer. C'est ce qui est loin d'avoir lieu dans nos cheminées d'appartement; une grande masse d'air froid s'introduit dans le conduit, et diminue la température des gaz qui ont eu le contact du feu. On atténue cet inconvénient, au moyen d'un diaphragme *cc*, qui diminue l'ouverture du chambranle. Si le conduit est oblique, la force ascensionnelle de la colonne, à égalité de hauteur verticale, reste la même.



Fig. 652.

Dans tout ce qui précède, nous avons fait abstraction des frottements du gaz ascendant, sur les parois du conduit. Pour rendre cette résistance aussi petite que possible, le conduit devra être vertical, et, dans le cas contraire, présenter le moins d'angles possible. L'intérieur devra être très uni et débarrassé de la suie. Un conduit circulaire est préférable à un conduit rectangulaire; car, à égalité de section, le contour du premier est minimum. Les foyers dans lesquels doit être appelée une grande quantité d'air, pour brûler beaucoup de combustible à la fois, comme ceux des chaudières à vapeur, sont munis de cheminées larges et très élevées, pour produire un fort tirage.

Calorifères à air chaud. — Les calorifères à air chaud nous présentent une nouvelle application de la force ascensionnelle de l'air dilaté. On les construit dans deux systèmes différents : dans les uns, la flamme du foyer enveloppe un tuyau plusieurs fois recourbé, dans lequel circule l'air à échauffer, qui se rend ensuite, par différents canaux ascendants, à des ouvertures nommées *bouches de chaleur* ; dans les autres, le tuyau est traversé par la flamme du foyer, et l'air à échauffer l'enveloppe extérieurement. Dans le premier cas, une partie de la chaleur, communiquée aux parois du fourneau, est perdue ; le dernier système est donc préférable. La *fig.* 653 représente une des nombreuses dispositions adoptées ; F est le foyer ; la flamme et la fumée sont appelées dans la cheminée *c*, dont le tirage les force à passer à travers les tuyaux *t*, *t*. L'air échauffé au contact des parois de ces tuyaux, monte dans

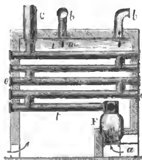


Fig. 653.

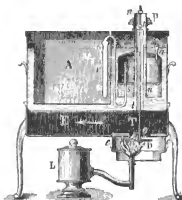


Fig. 654.

l'espace *m* et arrive à différentes bouches de chaleur *b*, *b*, par lesquelles il se répand dans les espaces à échauffer. Cet air est remplacé par l'air qui vient de l'extérieur. Les extrémités *o*, *o*, peuvent s'ouvrir pour le ramonage des tuyaux. — On adapte souvent aux poêles et même aux cheminées ordinaires des caisses en tôle, où l'air s'introduit par le bas, s'échauffe au contact de parois, et se répand dans la chambre par des bouches de chaleur placées à la partie supérieure.

883. Régulateurs du feu. — Nous avons indiqué (845) comment on a utilisé la dilatation des métaux pour régler la combustion dans des foyers. Les métaux se dilatant peu, M. Sorel a eu l'heureuse idée de les remplacer par l'air, dont la dilatation est beaucoup plus grande. La *fig.* 654 représente un des appareils qu'il a imaginés. A est une caisse dans laquelle on veut maintenir une température constante. Elle reçoit la chaleur de l'eau dans laquelle elle est plongée. Cette eau est échauffée par la flamme d'une lampe L, dont le bec traverse

un disque muni d'un rebord qui enveloppe le cylindre *cc*; de manière que l'air n'arrive à la flamme que par l'espace qui reste entre le rebord et le cylindre. Les gaz dégagés par la flamme passent par l'ouverture *o* et circulent dans l'espace E, avant de s'échapper au-dehors, en cédant de leur chaleur à l'eau. Un disque ou *registre*, D, est chargé de régler la combustion, en fermant plus ou moins l'ouverture *o*. Ce disque est suspendu par une tige, T, à une cloche annulaire *an* renversée sur l'eau; la tige T est fixée à l'extrémité d'un manchon *nn*, et traverse un tube *tt* soudé au fond de la cuve à eau. Un réservoir d'air, *r*, qui occupe toute la largeur de la chambre A, communique, par le tuyau *s*, avec la cloche, de manière à y faire sentir les moindres changements de température de la chambre A. Quand la température s'élève trop en A, l'air dilaté sous la cloche la soulève, le disque D obstrue le passage des gaz de la flamme, celle-ci brûle moins activement, et l'eau reçoit moins de chaleur. Quand la température s'abaisse, la cloche et le disque D descendent, et la flamme est activée par un courant d'air plus abondant.

On règle l'appareil, par tâtonnements, de manière à obtenir la température que l'on veut, soit en chargeant plus ou moins la cloche avec des poids, P, soit en faisant varier la quantité d'air qu'elle contient, au moyen du tube *a*, soit en modifiant la longueur de la mèche de la lampe. Quand l'appareil a atteint une température constante, ce qui demande environ une demi-heure, il ne varie plus que de $\frac{1}{10}$ de degré environ.

884. Machines à air dilaté. — Nous citerons enfin, comme dernière application de la dilatation de l'air, les effets mécaniques que l'on produit au moyen de l'accroissement de force élastique qui l'accompagne. Les machines destinées à utiliser cette force élastique sont disposées comme les machines à vapeur; ce n'est donc qu'après avoir étudié ces dernières que l'on peut se rendre facilement compte du jeu des machines à air dilaté.

CHAPITRE V.

CAPACITÉS CALORIFIQUES.

§ 1. — CAPACITÉ DES SOLIDES ET DES LIQUIDES.

885. Définitions. — Nous ne pouvons connaître la quantité de chaleur que contiennent les corps; nous ignorons même celle qui correspond à une élévation de température donnée; celle qu'il faudrait introduire, par exemple,

dans le corps pour élever sa température de 1°. Mais on est parvenu à découvrir que cette quantité n'est pas la même pour les différentes substances ; elles ne doivent pas recevoir toutes la même quantité de chaleur pour s'échauffer d'un degré; toutes n'ont pas, comme on dit aujourd'hui, la même *capacité pour la chaleur*.

Voici comment on prouve que les corps ont des capacités différentes pour la chaleur. Si d'abord on mêle deux masses égales d'eau, l'une à $t°$, l'autre à $t'°$, la masse la plus froide s'échauffe aux dépens de la plus chaude, qui cède de sa chaleur à la première, jusqu'à ce que la température du mélange soit uniforme. Cette température sera évidemment égale à la moyenne $\frac{1}{2}(t+t')$, en supposant qu'on néglige la chaleur que le vase a pu gagner ou perdre. Si maintenant, au lieu de la seconde masse d'eau à $t'°$, nous prenons une masse égale de mercure à $t'°$, et si t' est plus petit que t, l'expérience montre que la température finale θ du mélange est beaucoup plus élevée que la moyenne; ce qui prouve que la température de l'eau a moins baissé que celle du mercure n'a monté. La chaleur perdue par l'eau, pour que sa température baisse de $(t-\theta)°$, a donc été capable d'élever d'un plus grand nombre de degrés une masse égale de mercure. Il faut donc moins de chaleur au mercure qu'à l'eau pour s'échauffer de 1° ; les deux corps ont donc des capacités calorifiques différentes.

Cette remarquable découverte est due à Black; c'est de 1760 à 1765 qu'il la fit connaître dans ses leçons de chimie, à Glasgow. Aussitôt une foule de physiciens, parmi lesquels il faut citer Irvine, Crawfort, Wilcke, travaillèrent à l'envi à créer des méthodes pour comparer les capacités des différentes substances pour la chaleur, propriété que Wilcke désigna sous le nom de *chaleur spécifique*.

On nomme donc *capacité calorifique*, *chaleur spécifique*, ou *quantité de chaleur* d'un corps, la quantité de chaleur qu'il doit perdre ou gagner pour que sa température varie de 1°, sous l'unité de masse.

On a choisi pour *unité de chaleur*, *la quantité de chaleur que doit recevoir ou perdre l'unité de masse de l'eau pour s'échauffer ou se refroidir de* 1°, c'est-à-dire la chaleur spécifique de l'eau. Cette unité a reçu le nom de *calorie*. Il ne faut pas confondre cette espèce d'unité avec l'unité de température ou le degré. Ce dernier est l'effet, et l'autre la cause; et pour accroître d'une unité la température de masses égales de différentes substances, il faut des nombres différents d'*unités de chaleur*.

I. Mesure des capacités calorifiques.

886. Les physiciens ont employé trois méthodes différentes pour mesurer les *chaleurs spécifiques* des corps. Black, Wilcke, Crawfort, imaginèrent la méthode des mélanges; Laplace et Lavoisier adoptèrent celle de la fusion de la glace,

indiquée quelques années auparavant par Wilcke; et Meyer et Leslie celle du refroidissement.

Méthode des mélanges. — On prend un vase cylindrique en laiton mince et poli C (*fig.* 655), contenant un certain poids p d'eau, dont on connaît la température t; ce vase, nommé *calorimètre*, n'est soutenu que par des fils tendus, de manière qu'il ne peut perdre ni gagner de chaleur par son support. Le corps dont on veut mesurer la chaleur spécifique est porté dans une étuve, ou dans de l'eau bouillante, dont on connaît la température T, et soutenu par un fil très fin. On le transporte rapidement dans l'eau, on agite, et bientôt la température du mélange devient stationnaire et égale à θ. Pour déduire de ce résultat la chaleur spécifique x du corps, nous allons écrire une équation exprimant que la quantité de chaleur gagnée par l'eau et par le vase est égale à celle que le corps a perdue. Soit P le poids du corps, π celui du vase, et y sa chaleur spécifique. La quantité de chaleur gagnée par l'eau pour s'échauffer de $(\theta-t^\circ)$, est $p(\theta-t)$, puisqu'il faut une unité de chaleur pour échauffer l'unité de poids, de 1°. Le vase passe aussi de t° à θ°, car il est en métal très mince et possède à chaque instant la même température que l'eau, et il absorbe $\pi y\,(\theta-t)$. Le corps, en se refroidissant de $(\mathrm{T}-\theta)^\circ$, perd $\mathrm{P}x\,(\mathrm{T}-\theta)$ unités de chaleur; on aura donc

$$[1] \qquad \mathrm{P}x\,(\mathrm{T}-\theta)=p\,(\theta-t)+\pi y\,(\theta-t)=(\theta-t)\,(p+\pi y).$$

Cette équation contient, indépendamment de l'inconnue x, la valeur y de la chaleur spécifique du vase. Si cette quantité n'est pas connue d'avance, on la détermine, soit en prenant pour le poids P un morceau de la substance dont est formé le vase, alors x et y sont une seule et même quantité; soit en faisant deux expériences avec des données différentes, ce qui fournit deux équations, au moyen desquelles on peut calculer les deux inconnues x et y.

Nous avons admis dans ce calcul, que la quantité de chaleur correspondante à chaque degré de température d'un même corps est la même, ou que la quantité de chaleur nécessaire pour produire une certaine variation de température lui est proportionnelle. L'expérience montre qu'il en est ainsi jusqu'à 100°, pour la plupart des corps solides; car les résultats obtenus restent les mêmes, quelles que soient les températures t et T.

Équivalents en eau. — Si l'on désigne par c la chaleur spécifique d'un corps et par P son poids, la quantité de chaleur nécessaire pour élever sa température de 1° sera Pc. Or, un poids d'eau devrait être égal à Pc pour s'élever de 1° avec la même quantité de chaleur; c'est pourquoi le produit Pc se nomme l'*équivalent en eau* du corps. Ce poids d'eau met en jeu la même quantité de chaleur que le poids P du corps, pour une même variation de température. Dans la formule [1], πy représente donc l'équivalent du vase en eau.

Cas des liquides. — La méthode des mélanges s'applique aux liquides. Quand le liquide exerce une action chimique sur l'eau, ou le renferme dans un

vase de métal ou de verre, dont on connaît la chaleur spécifique c et le poids π', et qui possède toujours la même température que le liquide. Alors il faut ajouter au premier membre de l'équation [1] la quantité de chaleur cédée par ce vase, c'est-à-dire le terme $\pi' c\ (T-\theta)$. Il faudra de même renfermer les corps solides dans des vases, si l'eau exerce sur eux une action chimique, qui est toujours accompagnée de changements de température.

887. Corrections. — Il y a plusieurs corrections à faire aux résultats donnés par la méthode des mélanges, toute la chaleur abandonnée par le corps n'étant pas reçue par l'eau. Nous avons déjà vu comment on tient compte de celle qu'absorbe le vase. Il faut, en outre, ajouter au second membre de l'équation [1] les quantités de chaleur absorbées par l'agitateur et par le thermomètre. Pour l'agitateur, il suffit de connaître son poids et sa capacité déterminée par une première expérience approximative. Quant au thermomètre, il faudrait connaître le poids du verre et celui du mercure; mais on peut, plus simplement, mesurer préalablement sa capacité moyenne, en le plongeant seul, après l'avoir porté à T°, dans l'eau du calorimètre. Alors, en conservant les mêmes données, et appelant z la quantité de chaleur abandonnée par la masse du thermomètre pour s'abaisser de 1°, on aura $z\,(T-\theta) = (p+\pi y)\,(\theta - t)$; d'où l'on tirera la valeur de z qui représente l'*équivalent en eau* du thermomètre.

Perte extérieure de chaleur. — Une partie de la chaleur reçue par le calorimètre se perd par le rayonnement et le contact de l'air. On rend cette perte très faible, en choisissant les données de manière que la température du mélange s'élève peu au-dessus de la température de l'air; en employant un vase bien poli, et l'appuyant sur des cordons de soie tendus dans un autre vase cc (*fig.* 655) en laiton bien poli en dedans, et fermé en dessous pour empêcher les courants d'air. On atténue encore cette perte, par la *méthode de compensation* de Rumfort. On commence l'expérience en donnant à l'eau une température t *inférieure* à la température de l'air, et l'on choisit le poids P du corps, de façon que θ dépasse cette température, du même nombre de degrés; alors, pendant la première partie de l'expérience, le vase reçoit une certaine quantité de chaleur, de l'extérieur, et il en perd pendant la seconde partie; il y a donc une certaine compensation. Cependant les quantités reçue et perdue ne sont pas égales, parce que le calorimètre s'échauffe d'abord rapidement, de manière que le temps nécessaire pour que sa température atteigne celle du milieu ambiant est très court. Il s'échauffe ensuite de plus en plus lentement, de sorte que la seconde partie de l'expérience dure beaucoup plus que la première; il y a donc toujours une perte de chaleur qui n'est pas compensée.

Le mieux est de calculer la perte de chaleur due aux causes extérieures, ce qu'il est facile de faire au moyen de la loi de Newton, qui peut s'appliquer ici. Pour cela, dès que le corps est plongé dans l'eau, on suit de loin, au moyen d'une lunette L', la marche de son thermomètre t jusqu'à ce qu'il atteigne la température finale θ, et l'on note les températures τ, τ', τ'',... indiquées après

des temps égaux à une fraction m de minute. Si cette fraction n'est pas trop grande, on pourra admettre sans erreur sensible, que la température pendant chaque intervalle m, est égale à la moyenne $\frac{1}{2}(\tau+\tau')$, $\frac{1}{2}(\tau'+\tau'')$..., et les abaissements de température pendant chaque intervalle seront, d'après la loi de Newton,

$$C\left[\tfrac{1}{2}(\tau+\tau')-t\right], \qquad C\left[\tfrac{1}{2}(\tau+\tau')-t\right],\ldots.$$

C étant une constante. Et il suffira d'ajouter à la température finale observée θ, la somme S de ces abaissements de température, de sorte qu'il faudra substituer à θ, dans la formule [1], la quantité $\theta+S$.

Il nous reste à dire comment on détermine la constante C. Pour cela, quand le thermomètre, après avoir atteint la température maximum θ, commence à

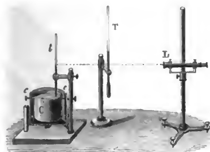


Fig. 655.

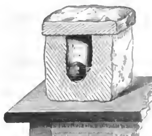


Fig. 656.

descendre, on observe les températures τ_1, τ'_1 qu'il indique au commencement et à la fin d'une minute, et l'on a d'après la loi de Newton

$$\tau_1-\tau'_1=C\left[\tfrac{1}{2}(\tau_1+\tau'_1)-t\right];$$

d'où l'on tire la valeur de C.

Il existe enfin une cause d'erreur provenant de la perte de chaleur qu'éprouve le corps en passant de l'étuve où on l'échauffe, dans le calorimètre; quoique le temps du transport soit très petit, l'erreur n'est pas négligeable, à cause de la haute température qu'on donne ordinairement au corps. Nous verrons plus loin (896) comment M. Regnault évite cette perte de chaleur.

888. Méthode par la fusion de la glace. — Cette méthode, célèbre par les travaux de Laplace et Lavoisier, est fondée sur ce résultat de l'expérience, qu'il faut 79,25 calories pour faire passer 1 gramme de glace à 0°, à l'état d'eau aussi à 0°. Cela posé, on choisit, comme le faisait Black, un bloc de glace bien pure et exempt de fissures; on y creuse une cavité (*fig.* 656), qu'une plaque de glace sert à fermer exactement. La glace étant à la température de 0°

et la cavité bien essuyée, on y place le corps dont on veut mesurer la chaleur spécifique, après avoir évalué son poids P et sa température T. Le corps se refroidit en fondant une portion de la glace, et sa température finit par arriver à 0°. On rassemble alors l'eau de fusion et on la pèse ; soit p son poids. Il a fallu $79,25\,p$ calories pour fondre ce poids p de glace ; or, cette quantité de chaleur est égale à celle que le corps a cédée pour descendre de T° à 0°, c'est-à-dire à PxT. On a donc $PxT = 79,25p$; d'où l'on tire la valeur de x.

Calorimètre de Laplace et Lavoisier. — La difficulté de se procurer des blocs de glace assez gros sans pores ni fissures, a fait imaginer le calorimètre de glace (*fig.* 657). Cet appareil est formé de trois enveloppes ; la plus petite est criblée de trous, et reçoit le corps, que l'on entoure de glace pilée, substance dont on remplit aussi l'intervalle qui existe entre les différentes enveloppes. Des couvercles garnis de glace ferment l'appareil à sa partie supérieure. La chaleur que perd le corps fait fondre une partie de la glace qui l'entoure, et de celle de l'espace B ; l'eau de fusion est recueillie par le robinet r. Un petit grillage f empêche la glace d'obstruer le robinet. La glace placée dans l'intervalle AAB et sur les couvercles, empêche la chaleur extérieure de se faire sentir dans l'enceinte B ; cette chaleur ne pouvant que fondre la glace qui touche l'enveloppe extérieure AA. L'eau de fusion se dégage par le robinet r'. Au bout de 30 heures environ, la température du corps est descendue à 0° ; on pèse l'eau recueillie par le robinet r, et l'on calcule, comme ci-dessus, la chaleur spécifique du corps.

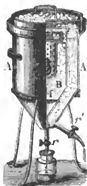


Fig. 657. — 1/16.

Pour appliquer cette méthode aux liquides, on les renferme dans un vase dont on connaît la chaleur spécifique ; on ajoute la chaleur perdue par ce vase à celle que le liquide cède, et l'on égale la somme à la quantité de chaleur absorbée par la glace qui a été fondue.

La méthode du calorimètre laisse quelque incertitude, à cause de l'eau qui reste engagée entre les fragments de glace, et qui n'est pas la même au commencement de l'expérience et à la fin, puisque, la glace ayant fondu en partie, les fragments n'ont plus ni la même forme ni les mêmes positions relatives. On atténue cette cause d'erreur, en opérant sur de grandes masses de corps. Il arrive aussi que l'air circule entre les fragments de glace, et en fond un peu ; c'est pourquoi il faut opérer à une température de 4° ou 5° au plus.

889. Méthode du refroidissement. — Les méthodes qui précèdent sont applicables aux substances qu'on a en masse assez grande. La méthode du refroidissement s'applique à celles dont on n'a que de petites quantités. Dulong et Petit l'ont employée de la manière suivante. Les corps dont on veut comparer les chaleurs spécifiques sont renfermés, sous le même volume, dans un vase très mince en métal, dans lequel se trouve un thermomètre. Ces corps sont en

poudre, afin de rendre leur conductibilité aussi égale que possible. On observe les temps qu'ils emploient sous la même température, pour se refroidir d'un même nombre de degrés, dans une enceinte vide à température constante. Les quantités de chaleur abandonnées pendant ces temps leur seront proportionnelles, toutes les circonstances étant égales de part et d'autre. De plus, ces quantités sont représentées par $pc\tau$, $p'c'\tau'$, en appelant τ l'abaissement de température, p, p' les poids des corps, c, c' leurs chaleurs spécifiques. On aura donc $pc\tau : p'c'\tau = t : t'$, en désignant par t et t' les temps observés.

M. Regnault a fait une étude approfondie de cette méthode[1]. La *fig.* 658 représente l'appareil qu'il a adopté, après un grand nombre d'essais. v est un vase cylindrique en argent doré, dans lequel se trouve renfermé le réservoir d'un thermomètre très sensible. La matière sur laquelle on veut opérer est réduite en poudre impalpable, soit par des moyens mécaniques, soit par des procédés chimiques; on l'introduit par le fond du vase, qui peut s'enlever, et on tasse autour du thermomètre. Ce vase est introduit dans une enceinte en laiton, garnie en dedans de noir de fumée. La plaque c, fixée au thermomètre, termine l'enceinte par en haut. Le thermomètre s'ajuste à la tubulure de l'enceinte, au moyen d'un collier brisé à vis (I, 322), qui presse l'un sur l'autre les deux rebords coniques appartenant, l'un à la tubulure, l'autre à la virole à laquelle est fixé le thermomètre, dont un tube de verre t enveloppe la tige. On fait le vide par le tube r. L'humidité ayant une grande influence sur les résultats, on dessèche l'appareil en y faisant entrer plusieurs fois de l'air sec, après avoir fait le vide, pendant que l'appareil est plongé dans de l'eau à 40°. Cela fait, quand le thermomètre marque 35°, on plonge l'appareil dans la glace fondante, on attend que le thermomètre marque 20°, et l'on note, sur un chronomètre à pointage, les instants où le thermomètre passe par 15°, 10°, 5°. Les températures s'observent de loin, avec une lunette mobile sur une règle verticale. Si p et p' sont les poids de deux substances remplissant successivement le vase v; c, c' leurs chaleurs spécifiques; k l'équivalent en eau du vase et de la portion du thermomètre qui s'y trouve renfermée; t et t' les temps employés à produire un même abaissement de température, on aura $pc + k : p'c' + k = t : t'$. La quantité k peut se calculer d'après les poids et les chaleurs spécifiques de l'argent et des portions de mercure et de verre qui sont renfermées dans le vase. Mais il est plus simple de la calculer au moyen de deux expériences faites en remplissant le vase avec deux substances

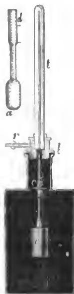


Fig. 658.

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. IX, p. 327.

ayant des chaleurs spécifiques déterminées d'avance par la méthode des mélanges; alors l'équation précédente donne la valeur de k.

Malgré les précautions les plus minutieuses et les efforts les plus persévérants, M. Regnault n'a pu obtenir de résultats satisfaisants de cette méthode. La différence de conductibilité des substances employées, qui fait que la chaleur ne se rend pas avec la même facilité, de l'intérieur à la surface rayonnante, doit avoir une certaine influence. Cependant, ce qui montre qu'il y a quelque autre cause, c'est que la même substance au même état donne des résultats qui présentent des différences notables. MM. de la Rive et Marcet ont reconnu que le tassement de la substance, qu'il est impossible d'obtenir identique dans deux expériences différentes, a une grande influence sur les résultats; par exemple, la chaleur spécifique du charbon en poudre, comparée à celle du cuivre, est d'autant plus petite que la substance est plus fortement tassée.

Cas des liquides. — Les incertitudes dont nous venons de parler n'existent plus pour les liquides, surtout quand ils ne diffèrent pas beaucoup, par leurs propriétés physiques. M. Regnault renfermait le liquide dans un petit flacon mince à long col *ad* (*fig.* 658) dans lequel plongeait le thermomètre. Pour que le réservoir restât plein pendant le refroidissement, on mettait assez de liquide pour qu'il occupât une partie du col autour de la tige du thermomètre. Le poids de la substance était représenté par sa densité à la température de l'observation.

890. Résultats généraux. — Les différentes méthodes qui précèdent, appliquées aux solides et aux liquides, ont montré que les liquides ont généralement une plus grande capacité pour la chaleur que les solides. L'eau présente la plus grande chaleur spécifique; d'où il résulte que les capacités des autres corps sont exprimées par des fractions. C'est à cause de cette grande capacité que l'eau s'échauffe et se refroidit si lentement. De là aussi son grand pouvoir refroidissant. C'est en absorbant beaucoup de chaleur qu'elle peut ensuite la transporter et la répandre en grande quantité, dans les calorifères à circulation d'eau chaude (821).

En général, une même substance présente une plus grande capacité à l'état liquide qu'à l'état solide; ce résultat important a été découvert par Irvine, et étudié tout spécialement par M. Person, par une méthode que nous décrirons plus loin. Comme exemple, nous citerons la glace, dont la capacité est $\frac{1}{2}$, celle de l'eau étant 1. Il y a des corps, comme le mercure, le phosphore, pour lesquels la différence des capacités à l'état solide et à l'état liquide est à peine sensible.

Relation avec la densité. — Les corps les moins denses ont généralement la plus grande capacité. Ainsi, les métaux, qui sont les corps les plus denses, absorbent peu de chaleur pour s'échauffer, et parmi eux, les plus denses possèdent la plus faible capacité. Par exemple l'or, le platine, le mercure ont pour chaleur spécifique 0,032 environ; d'où il résulte que la quantité de chaleur nécessaire pour porter l'eau de 0° à 100°, élèverait la température de ces

métaux, de 3125°, c'est-à-dire au-delà du rouge-blanc éblouissant; l'argent a pour capacité 0,056; le cuivre, le zinc, 0,095; le fer, le nickel, 0,11; le potassium, qui est moins dense que l'eau, a donné 0,17.

Le mercure, malgré son état liquide, possède une faible capacité, ce qui est favorable à son emploi dans la mesure des températures; c'est que ce métal est un des plus denses. L'oxydation diminue la densité des métaux, et augmente leur chaleur spécifique. C'est, en général, à l'état gazeux qu'une même substance présente la plus grande capacité et la plus faible densité. Pour citer le cas extrême, nous dirons que le gaz hydrogène, le moins dense de tous les corps, a la plus grande capacité 3, 4; c'est la seule qui soit supérieure à celle de l'eau. Enfin, un accroissement de température diminue la densité des corps et augmente leur capacité, comme nous allons le voir.

891. Circonstances qui font varier la capacité des solides. — La capacité calorifique d'une même substance solide dépend du mode d'agrégation de ses molécules, et par suite, des actions physiques ou mécaniques auxquelles on l'a soumise. On peut dire que, en général, tout ce qui augmente la densité et le degré d'agrégation des molécules diminue la capacité pour la chaleur. Wegdwood avait déjà remarqué que l'argile cuite possède une capacité d'autant plus faible qu'elle a éprouvé un retrait plus prononcé par la calcination.

M. Regnault a obtenu les résultats suivants, par la méthode des mélanges, en suivant la marche que nous expliquerons plus loin (896). La capacité du colcothar diminue à mesure que la calcination produit une agrégation plus grande, et cette capacité finit par devenir égale à celle du fer oligiste naturel. L'oxyde de nickel calciné à la forge, donne une capacité sensiblement plus faible que celui qui a été simplement calciné au rouge.

Le cuivre rouge bien ductile, ayant pour capacité 0,09501, a donné 0,09360, aprés avoir été écroui à coups de marteau; le recuit lui a rendu sa capacité primitive. Le plomb et l'étain n'ont pas éprouvé de changement dans leur capacité aprés avoir été frappés au balancier; mais leur densité n'avait pas non plus augmenté. L'acier, le métal des cymbales, les larmes bataviques, recuits ou trempés, n'ont donné que des différences trés faibles, qui peuvent être attribuées aux erreurs d'observation.

Le carbonate de chaux, le soufre et surtout le carbone présentent des capacités trés différentes suivant leur état physique, comme on le voit dans le tableau suivant.

CARBONATE DE CHAUX.		SOUFRE.		CARBONE.	
Aragonite	0,2085	Fondu récemment.	0,1844	Noir animal	0,2608
Spath d'Islande . .	0,2085	Fondu depuis 2 mois	0,1803	Charbon de bois . .	0,2415
Craie	0,2148	Fondu depuis 2 ans	0,1764	Coke, anthracite.	0,2008
Marbre blanc saccharoïde	0,2158	Cristallin naturel. .	0,1776	Graphite	0,2018
				Diamant	0,1468

Nous avons vu (I, 417) que l'état cristallin du soufre coulé change avec le temps ; c'est pour cela que sa capacité se rapproche peu à peu du soufre naturel.

MM. Delarive et Marcet, par la méthode du refroidissement [1], ont trouvé pour le diamant 0,1192. Du charbon provenant d'une même branche de peuplier leur a donné le nombre 0,2964 ; après avoir été trempé (en le portant au rouge blanc dans un creuset de platine hermétiquement fermé qui fut ensuite plongé dans l'eau), il donna le nombre 0,2009. Il est à remarquer que la densité avait varié par la trempe, à peu près en raison inverse de la capacité. En général, plus un charbon est divisé, plus sa chaleur spécifique est considérable.

892. Variation de la capacité avec la température. — Il résulte des expériences de Wilke, Crawfort, Meyer, Deluc, Laplace et Lavoisier, Kirwan, Rumfort, que *jusqu'à* 100°, *la chaleur spécifique des solides est constante.* Dalton a avancé, depuis, que la chaleur spécifique d'un corps doit augmenter avec sa température, une partie de la chaleur devant être employée, selon lui, à produire la dilatation.

Pour vérifier cette conjecture, Dulong et Petit ont fait des expériences jusqu'à 300°, et ils ont reconnu que *la capacité des corps solides augmente avec leur température à partir de* 100°. Ils ont employé la méthode des mélanges ; le corps, façonné en anneau plat afin qu'il présentât beaucoup de surface, était échauffé dans un bain d'huile ou de mercure bouillant. On tenait compte de la couche d'huile adhérente, en mesurant d'avance son poids à la température de l'expérience. Voici les résultats trouvés :

SUBSTANCES.	CAPACITÉS MOYENNES		T
	entre 0° et 100°.	entre 0° et 300°.	
Fer	0,1098	0,1218	332°,2
Mercure	0,0330	0,0350	318,2
Zinc	0,0927	0,1015	328,5
Antimoine	0,0507	0,0549	324,8
Argent	0,0557	0,0611	329,3
Cuivre	0,0949	0,1013	320,0
Platine	0,0355	0,0355	317,9
Verre	0,1770	0,1990	322,1

Pyromètre à capacité constante. — La colonne marquée T dans le tableau précédent, indique les températures correspondantes à 300° du thermomètre à air, telles qu'elles seraient déduites de la capacité, supposée constante, des diverses substances. Ces températures se calculent au moyen de

[1] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. LXXV, p. 113 ; et 3e s., t. II, p. 121.

l'équation $Pc(T-\theta)=(p+\pi y)(\theta-t)$, qui exprime que la chaleur perdue par le corps est égale à celle que gagnent l'eau et le vase, et dans laquelle on remplace c par la chaleur spécifique supposée la même à toutes les températures.

Cette méthode fournit un moyen pyrométrique assez simple. Veut-on obtenir la température d'un fourneau, on y plonge une masse de platine, qui en prend la température, et que l'on porte ensuite dans l'eau d'un calorimètre dont l'échauffement fait connaître la température du platine. Si l'on ne connaît pas la capacité calorifique de ce métal, on fait deux observations avec deux masses de platine égales ou inégales, et deux appareils différents ; ce qui donne deux équations entre lesquelles on élimine la chaleur spécifique.

Les températures obtenues par ce moyen ne sont pas comparables à celles que donne le thermomètre à air, car la chaleur spécifique des solides augmente avec la température ; mais avec le platine, les résultats doivent être bien près d'être exacts, comme il résulte des nombres du tableau précédent. On pourrait obtenir de meilleurs résultats si l'on connaissait les chaleurs spécifiques moyennes du platine entre 0° et diverses températures très élevées : après avoir calculé la température du platine, au moyen de la capacité qui correspond à cette température inconnue, évaluée par estime, on se servirait de la capacité correspondante à la température ainsi obtenue, pour en calculer une nouvelle valeur qui serait plus exacte. Pour cet objet, M. Pouillet a mesuré les chaleurs spécifiques moyennes du platine entre 0° et les températures ci-dessous, et il a trouvé les nombres inscrits à la seconde ligne.

100°	300°	500°,	700°,	1000°,	1200°
0,0335	0,03434	0,03518	0,03602	0,03728	0,03818

Ces résultats ont été obtenus par la méthode des mélanges. La boule de platine échauffée était jetée dans un panier en fil de cuivre plongé dans l'eau, et dont on tenait compte dans le calcul.

Cas des corps faciles à fondre. — L'augmentation de la capacité avec la température est d'autant plus prononcée que les corps sont plus près de leur point de fusion. Aussi, dans les expériences de Dulong et Petit, faites sur des corps peu fusibles, ne s'est-elle manifestée qu'au-delà de 100°. Pour le *platine*, qui est le métal le plus difficile à fondre, l'accroissement est très faible. Le *plomb* est plus rapproché de son point de fusion, et M. Regnault a trouvé pour la capacité du métal, 0,03065, entre 10° et —77°,75, température obtenue en le plongeant dans l'acide carbonique solide, et 0,0313 entre 10° et 100°. Le *phosphore*, qui fond à 45°, a donné les nombres 0,1740, de —77°,55 à 10° ; 0,1788, de —21° à 70° ; et 0,1887, de —10° à 30°.

893. Variation de la capacité des liquides. — C'est surtout chez les liquides que les variations de la capacité avec la température sont sensibles, même au-dessous de 100°. Cela se voit dans le tableau suivant, qui contient

une partie des résultats obtenus par M. Regnault, par des méthodes que nous décrirons plus loin.

LIQUIDES.	CAPACITÉS MOYENNES		
	de 20° à 15°.	de 15° à 10°.	de 10° à 5°.
Mercure	0,0290	0,0283	0,0282
Alcool à 36°	0,6725	0,6651	0,6588
Acide acétique cristallisable	0,4618	0,4599	0,4587
Térébène	0,4267	0,4156	0,4154
Essence de citron	0,4501	0,4424	0,4489
Chlorure de titane	0,1828	0,1802	0,1810
Chlorure de soufre	0,2038	0,2024	0,2048
Sulfure de carbone	0,2206	0,2183	0,2179
Ether sulfurique	0,5157	0,5158	0,5207
Esprit de bois	0,6009	0,5868	0,5901

Le *brôme* adonné les capacités moyennes 0,10513 et 0,11294, de —6° à 10°, et de 13° à 58°; et l'*essence de térébenthine* 0,426, de 15° à 20°, et 0,4672, de 15° à 100°; l'accroissement est donc considérable. Il provient, au moins en partie, de l'absorption d'une plus grande quantité de chaleur, occasionnée par l'accroissement de la dilatation quand la température augmente (891).

La capacité moyenne d'un liquide étant une fonction de sa température, on peut représenter les quantités totales de chaleur absorbées entre 0° et t° par la formule empirique $C = at + bt^2 + ct^3$. On détermine les constantes au moyen de trois observations faites entre 0° et trois valeurs de t. En divisant C par t, on obtient la capacité moyenne entre 0° et t°. On peut encore se rendre compte des variations de capacité des liquides, par une construction graphique. La courbe sera convexe vers l'axe des x, sur lequel on compte les températures prises à partir de 0°; et l'accroissement de chaleur spécifique pour 1°, sera représenté, pour une température donnée, par la tangente trigonométrique de l'angle que fait avec l'axe des x, la tangente à la courbe au point considéré (I, 104), ce qui suppose que la courbe se confond avec une ligne droite dans l'espace qui correspond à une différence de température de 1°.

Eau. — M. Regnault a étudié spécialement les changements de capacité de l'eau, à l'occasion de ses expériences sur les vapeurs [1]. L'appareil dont il a fait usage se compose d'un calorimètre en tôle galvanisée, Sr (*fig.* 659) muni d'un agitateur *nm*, et surmonté d'un tube gradué en verre *e*. L'eau dont on veut évaluer la capacité est échauffée dans une chaudière en cuivre C, de 70 litres de capacité, dont les parois, de 5mm d'épaisseur, sont consolidées par une forte

[1] *Mémoires de l'Institut* (Académie des sciences), t. XXI, p. 729.

armature en fer, de manière à pouvoir supporter de fortes pressions. La chaudière est fermée par un couvercle solidement boulonné, muni de deux tubes en fer fermés à leur partie inférieure, remplis d'huile, et dans lesquels plongent deux thermomètres τ, τ. A la paroi latérale est adapté un robinet R, précédé d'un tube T, qui s'enfonce presque jusqu'au fond de la chaudière, et dont l'ouverture est sur le côté. A l'opposé, le robinet R porte un autre tube R*m*, qui pénètre jusqu'au milieu du calorimètre, et dont l'extrémité fermée porte sur son contour un grand nombre de trous. Le calorimètre est préservé du rayonnement de la chaudière par un écran *ab* formé d'une boîte en tôle, dans laquelle on fait passer un courant d'eau qui s'échappe par le tube recourbé S, dont l'extrémité est figurée derrière le calorimètre. La capacité du calorimètre jusqu'au zéro de la division du tube *e*, a été déterminée d'avance en pesant l'eau qu'il contient à une température connue. On a aussi évalué le poids de l'eau contenue dans une division du tube *e*.

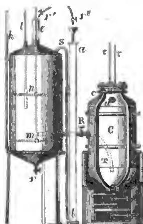


Fig. 659.

Pour faire une expérience, on comprime de l'air dans la chaudière, de manière à retarder l'ébullition jusqu'à la température à laquelle on veut porter l'eau. Quand l'ébullition a lieu, on remplit le calorimètre jusqu'au zéro du tube *e* (*fig.* 659); on extrait, par le robinet *r*, une certaine quantité d'eau que l'on pèse, puis on note la température au moyen du thermomètre *t*. On ouvre aussitôt le robinet R, et l'eau bouillante est chassée dans le calorimètre. Le niveau monte dans le tube *h*, et quand on voit qu'il est près d'atteindre le tube *e*, on ralentit l'arrivée de l'eau, puis on ferme tout-à-fait le robinet R quand le niveau arrive vers le milieu du tube *e*. On observe en même temps la température, sur le thermomètre *t*. Le poids de l'eau introduite dans le calorimètre se déduit du volume qu'elle occupe et du poids de celle qu'il contenait au moment où l'on a ouvert le robinet R. On fait toutes les corrections relatives à la chaleur perdue au-dehors, et à celle qui passe par conductibilité à travers le tube R*m*.

Voici les principaux résultats trouvés par M. Regnault, pour les capacités moyennes de l'eau entre 0° et les températures données par le thermomètre à air :

	VALEURS DE *c*.		VALEURS DE *c*.
De 0° à 40°	1,0013	De 0° à 160°	1,0109
De 0° à 80°	1,0035	De 0° à 200°	1,0160
De 0° à 120°	1,0067	De 0° à 230°	1,0204

Ces résultats sont donnés par la formule $C = t + 0{,}00002\,t^2 + 0{,}0000003\,t^3$, en divisant C par t. On voit que l'augmentation de capacité de l'eau est peu prononcée jusqu'à 200° ; elle est à peine sensible au-dessous de 100°, ce qui est très favorable à la mesure des capacités par la méthode des mélanges.

894. Capacité des sels hydratés. — La quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1° la température d'un mélange de plusieurs corps, est égale à la somme des quantités qu'absorbe chaque corps ; de manière que, si l'on appelle m, m', m''... les masses de plusieurs corps, et c, c', c''... leurs chaleurs spécifiques, celle du mélange sera $\frac{mc + m'c' + m''c''\ldots}{m + m' + m''\ldots}$, c'est-à-dire la moyenne. M. Person a reconnu que les sels hydratés sont dans ce cas ; leur capacité est représentée par $\frac{mc + m'c'}{m + m'}$, en désignant par m, m' les proportions de sel et d'eau combinés, et en prenant pour c la chaleur spécifique du sel anhydre, et pour c' la *chaleur spécifique de la glace*. Il résulte de là ce fait remarquable, que l'eau combinée dans les sels est à l'état solide, ou du moins possède la même capacité qu'à l'état solide. — Il résulte aussi des recherches de M. Person, que *vice versâ*, la capacité d'un sel dissous dans l'eau est celle qu'il possède *à l'état liquide* ; car ce n'est que dans cette supposition que la loi se vérifie avec quelque approximation[1].

II. Lois des chaleurs spécifiques des atomes.

895. LOI DES CHALEURS SPÉCIFIQUES DES ATOMES SIMPLES. — Dulong et Petit, ayant mesuré, par la méthode du refroidissement, la chaleur spécifique de treize corps simples, ont découvert, en 1819, la loi suivante, une des plus belles de la physique : *les atomes de tous les corps simples possèdent la même capacité pour la chaleur*[2]. Voici comment ils y sont arrivés : désignons par C la chaleur spécifique d'un corps et par n le nombre d'atomes contenus dans l'unité de masse, $c = C : n$ sera la chaleur spécifique d'un atome, et $p = 1 : n$ sera le poids d'un atome (880). Si nous multiplions C par p, nous trouvons $C \times p = c$. La chaleur spécifique d'un atome est donc égale au produit de la chaleur spécifique de la substance, par son poids atomique. Or les poids atomiques relatifs étant déterminés par les lois de la chimie, le produit $C \times p$ a été trouvé à peu près constant, et égal à 0,37 environ. Les différences ne doivent pas être attribuées seulement aux incertitudes de la méthode d'observation employée, mais encore à l'influence de l'état du corps sur sa chaleur spécifique (891).

La loi de Dulong et Petit peut aussi s'énoncer ainsi : *les chaleurs spécifiques des corps simples sont en raison inverse de leurs poids atomiques.*

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XXXIII, p. 437.
[2] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. X, p. 395.

Il y a certains corps simples dont le poids atomique n'a pu être déterminé d'une manière certaine au moyen des données de la chimie. Quand il en est ainsi, l'hésitation porte sur des nombres qui sont des multiples très simples les uns des autres. La loi de Dulong et Petit indique alors quel est le nombre qu'il convient d'adopter.

896. Expériences de M. Regnault. — Depuis la découverte de la loi des capacités des atomes, les progrès de la chimie ont conduit à changer le poids atomique de quelques substances pour lesquelles la loi se trouve dès lors en défaut si l'on se sert des capacités trouvées par Dulong et Petit. Des expériences nouvelles étaient donc nécessaires ; elles ont été faites par M. Regnault, et ont confirmé la loi, tout en montrant l'inexactitude de quelques-unes des capacités adoptées par Dulong et Petit, inexactitude qui provenait des incertitudes de la méthode du refroidissement.

M. Regnault a adopté la méthode des mélanges qu'il a considérablement perfectionnée[1]. La *fig.* 660 représente l'ensemble de l'appareil qu'il a employé.

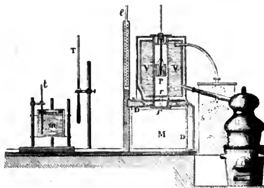


Fig. 660.

La substance à étudier est mise, en fragments, dans une petite corbeille en fil de laiton P, au milieu de laquelle est ménagé un espace cylindrique, qui reçoit le réservoir d'un thermomètre. Cette corbeille est suspendue par des fils de soie, dans une étuve composée de trois enveloppes en fer-blanc. L'espace P est rempli d'air. L'espace VV est parcouru par un courant de vapeur d'eau, venant de la chaudière C, et s'échappant ensuite par un tube qui la conduit dans le serpentin *s*, où elle se condense. L'enveloppe extérieure retient autour des parois de la capacité VV, une couche d'air qui empêche le refroidissement.

Le calorimètre dans lequel se fait le mélange consiste en un vase cylindrique *m* en laiton très mince, supporté par des fils de soie croisés, tendus sur un petit

[1] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. LXXIV, p. 19.

chariot qu'on fait glisser dans une rainure, quand on veut amener le vase en M, au-dessous de l'étuve. Une enveloppe coudée en fer-blanc DD, remplie d'eau que l'on renouvelle souvent, préserve l'espace M du rayonnement de l'étuve et de la chaudière C. En *rr* est une ouverture, fermée au moyen d'un double registre, par laquelle on peut faire tomber la corbeille dans le calorimètre *m* quand il est amené en M. Un thermomètre *t*, dont le réservoir occupe toute la profondeur du calorimètre, en donne la température. Le thermomètre fixe T donne celle de l'air ambiant, pour les corrections.

Dans chaque expérience on attend que le thermomètre P ait pris une température fixe, ce qui exige environ deux heures ; on attend encore une heure au moins, et l'on prend, de loin avec une lunette, la température des thermomètres *t* et T. On amène alors le calorimètre en M, en levant l'écran *e* ; et, tirant le registre *rr*, on fait descendre la corbeille dans le calorimètre *m*, puis on le ramène devant la lunette. Un aide agite la corbeille dans l'eau, pendant qu'on observe la marche du thermomètre *t*, qui atteint ordinairement son maximum au bout de une à deux minutes.

On corrige le résultat observé, de l'effet produit par le milieu extérieur, en suivant une méthode analogue à celle que nous avons exposée plus haut (887). Le calorimètre, d'abord à 1 ou 2° au-dessous de la température ambiante, se trouvait à la fin de l'expérience à 1 ou 2 degrés au-dessus. Si nous désignons par p le poids de l'eau du calorimètre, y compris l'équivalent du vase en eau ; par P le poids du corps; par T, t, θ, les températures du corps, de l'eau, et du mélange ; par π et c le poids et la chaleur spécifique de la corbeille, et enfin par θ' la correction motivée par l'action du milieu ambiant, on aura, pour déterminer x,

$$(\mathrm{P}x+\pi c)(\mathrm{T}-\theta)=p(\theta+\theta'-t).$$

Dans les expériences de M. Regnault, θ' n'était que de 3 à 4 centièmes de degrés.

Quand la matière est pulvérulente, comme certains métaux, la plupart des oxydes métalliques, on cherche à l'agréger par la compression aidée du choc, ou bien on l'humecte et on la pétrit en forme de boulettes que l'on calcine. Quand ces moyens ne réussissent pas, la substance est tassée dans de petits tubes de laiton très mince, de 60^{mm} de hauteur et de 15^{mm} de diamètre. On tient compte, dans le calcul, de la matière de ces tubes. Dans ce cas, le thermomètre *t* met 10 à 15 minutes pour arriver au maximum, à cause de la mauvaise conductibilité de la substance ; ce qui rend les résultats moins sûrs. De plus, il y a une autre cause d'erreur : le maximum persiste pendant plusieurs minutes, ce qui prouve que le calorimètre perdant alors par rayonnement autant de chaleur qu'il en reçoit du corps, ce dernier n'a pas exactement la température de l'eau. M. Regnault a trouvé moyen de calculer approximativement l'excès de température du corps sur l'eau; cependant il est préférable de plonger le corps pulvérulent dans l'eau ; quoiqu'il y ait de la chaleur dégagée par l'effet de

l'imbibition, comme nous le verrons plus tard ; l'erreur qui en provient étant toujours très petite.

Quand le corps est soluble dans l'eau, on remplace ce liquide par l'essence de térébenthine, dont la capacité est déterminée à l'avance. Ce liquide est aussi préférable pour les substances dont on n'a que de petites quantités, parce que sa capacité 0,43 est beaucoup plus petite que celle de l'eau.

Pour soumettre à un contrôle décisif la méthode expérimentale qui précède, M. Regnault l'a appliquée à la mesure de la chaleur spécifique de l'eau ; il a trouvé, dans deux expériences faites sur ce liquide à 97°, les valeurs 1,00709, 1,00890 ; et comme nous savons que la chaleur spécifique de l'eau augmente avec la température, même avant 100° (893) on voit que la méthode ne comporte que des erreurs très faibles.

Autres méthodes. — M. Regnault est revenu à plusieurs reprises sur la mesure des capacités des corps simples, toutes les fois qu'il pouvait se procurer

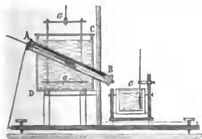


Fig. 661.

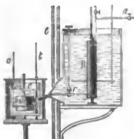


Fig. 662.

des échantillons suffisamment purs. Dans certains cas, par exemple quand il lui fallait opérer à une basse température, il a fait usage de l'appareil (*fig.* 661), que nous décrivons en indiquant comment il a été employé pour mesurer la capacité du *sodium* au-dessous de 0°. Le métal, coulé sous l'huile de naphte, en forme de cylindre creux, et enveloppé d'une feuille d'étain, était refroidi dans un cylindre en laiton AB, fixé obliquement dans une cuve oblongue CD, remplie d'un mélange de glace pilé et de chlorure de calcium continuellement agité au moyen des pièces *aa'*. Le tube était fermé par des obturateurs A, B. Quand la température du sodium, donnée par le thermomètre *t*, était devenue constante, ce qui avait lieu vers — 30°. On laissait descendre le métal, qui était retenu par des fils de soie, dans un calorimètre *c* rempli d'huile de naphte. Ce liquide était refroidi, et l'on déduisait de la température finale et des autres données de l'expérience, la capacité du sodium par rapport à l'huile de naphte. La capacité de ce liquide par rapport à l'eau était ensuite déterminée en y plongeant

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XLVI, p. 269.

une masse de plomb dont la capacité était connue, écrivant que la chaleur cédée à l'huile est égale à celle que perd le plomb, et tirant de l'équation la valeur de la capacité de l'huile. Il est facile de voir que cet appareil peut servir pour des températures élevées.

Liquides. — Pour mesurer la capacité des liquides au moyen des deux appareils précédents, on les renferme dans de petits tubes de verre minces scellés à la lampe.

Dans ses expériences les plus récentes, M. Regnault a opéré par une méthode analogue à celle qui lui avait servi pour les capacités de l'eau dans les hautes températures (893) au moyen de l'appareil (*fig.* 662), avec lequel on peut opérer à des températures très basses comme à des températures très élevées. Le liquide est renfermé dans un réservoir cylindrique R plongé dans un bain continuellement agité, qui lui communique une température fixe. On ouvre le robinet *r*, et le liquide comprimé par de l'air qu'on a introduit par le tube *a*, est chassé dans un vase V plongé au milieu de l'eau du calorimètre *cc*. Le liquide arrive dans le vase V sans changer sensiblement de température, à cause du renflement *m* qui enveloppe le tube *r*. On observe la température finale du thermomètre *t* et l'on achève l'opération comme à l'ordinaire.

897. Résultats. — Le tableau suivant contient les principaux résultats obtenus par M. Regnault avec les corps simples. Nous avons remplacé les nombres qu'il avait d'abord publiés pour quelques corps, par ceux qu'il a obtenus plus récemment en opérant sur des échantillons plus purs.

La chaleur spécifique du potassium a été prise en le refroidissant dans l'acide carbonique solide et cherchant l'abaissement de température qu'il faisait éprouver à de l'huile de naphte renfermée dans un petit calorimètre[1]. Pour le mercure solide, ce métal était renfermé dans une ampoule de verre, terminée par une longue tige de verre effilée, par laquelle on pouvait la transporter et l'agiter dans le calorimètre. Le mercure était congelé dans l'acide carbonique solide, à —77°,75, puis transporté dans le calorimètre, qu'il refroidissait. La chaleur abandonnée au mercure par le calorimètre, se compose : 1° de celle qui est nécessaire pour échauffer le mercure solide depuis — 77°,75 jusqu'à —40°, qui est son point de fusion ; 2° de la chaleur que le mercure absorbe pour passer de l'état solide à l'état liquide ; 3° de la chaleur absorbée par le mercure liquide pour passer de —40° à la température finale du calorimètre ; 4° de la chaleur que prend l'ampoule de verre pour passer de —77°,75 à cette température finale. La chaleur nécessaire pour la fusion étant supposée connue, ainsi que la chaleur spécifique du mercure liquide, on calculait facilement la chaleur absorbée par le mercure solide pour passer de —77°,75 à —40°.

Le brôme a été étudié, par un moyen analogue, à l'état liquide et à l'état solide ; c'est à l'état solide qu'il satisfait à la loi.

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XXVI, p. 261.

SUBSTANCES.	CHALEURS spécifiques C.	POIDS atomiques adoptés p	PRODUIT C × p.
Déterminations préliminaires.			
Laiton	0,09391	»	»
Verre	0,19768	»	»
Eau	1,0080	»	»
Essence de térébenthine	0,42593	»	»
Corps simples solides.			
Fer	0,11379	339,21	38,597
Zinc	0,09555	403,23	38,526
Cuivre	0,09515	395,70	37,849
Cadmium	0,05669	696,77	39,502
Argent	0,05701	675,80	38,527
Arsenic	0,08140	470,04	38,261
Plomb	0,03140	1294,50	40,647
Bismuth	0,03084	1330,37	45,034
Antimoine	0,05077	806,45	41,029
Etain des Indes	0,05623	735,29	41,345
Nickel	0,11095	369,68	41,000
Cobalt	0,10696	368,99	39,468
* Manganèse très carburé	0,14411	345,89	49,848
* Uranium	0,06190	677,84	41,960
* Tungstène	0,03636	1183,00	43,002
* Molybdène	0,07218	598,52	43,163
Osmium	0,03063	1244,2	38,109
* Aluminium	0,2181	170,98	35,15
Rhodium	0,05408	652,1	35,26
* Iridium	0,363	1233,50	44,76
Platine laminé	0,03243	1233,50	39,993
Palladium	0,05927	665,90	39,468
Or	0,03244	1243,01	40,328
Soufre	0,20259	201,17	40,754
Sélénium	0,07616	494,58	37,667
Tellure	0,04737	801,76	38,200
Potassium	0,16956	245,00	41,642
Sodium	0,2934	143,60	42,100
Iode	0,05412	789,75	42,703
Charbon	0,024111	152,88	36,873
Phosphore	0,1887	196,14	37,024
Corps simples liquides.			
Mercure	0,03332	1265,82	42,149
Mercure solide	0,03241	»	»
Brôme liquide	0,11094	»	»
Brôme solide (— 28°)	0,08432	489,1	41,2

Il résulte du tableau qui précède, que la loi des atomes doit être adoptée ; car les poids atomiques varient de 200 à 1400, tandis que les produits des chaleurs spécifiques par les poids atomiques ne varient que de 38 à 42.

Ces variations sont sans doute bien plus grandes que celles qui résultent des erreurs d'observation, mais il faut considérer que la chaleur spécifique est mesurée à des distances différentes du point de fusion des différents corps, et qu'elle augmente pour un même corps à mesure qu'on s'approche de ce point (892). De plus, sa valeur dépend de l'état physique de la substance, comme nous l'avons vu (891), et aussi de l'état de mollesse que prennent certains corps quand on les échauffe, et qui est accompagné d'une absorption de chaleur, qui se dégage ensuite pendant l'expérience. Par exemple, le *phosphore rouge* ou phosphore amorphe n'a pour capacité que 0,16911; c'est qu'il ne se ramollit pas comme le phosphore ordinaire. Le *sélénium* vitreux, qui se ramollit bien plus que le sélénium métallique, a donné 0,1031, au lieu de 0,07446. A une très basse température, les deux variétés ont donné à peu près le même résultat, 0,07468 et 0,07446.

Parmi les corps simples étudiés par M. Regnault, l'urane ne satisfaisait pas à la loi. Cette anomalie provoqua les recherches de M. Peligot, qui reconnut que ce corps n'est pas un métal, mais un oxyde, dont il parvint à séparer le véritable métal, qu'il nomma l'*uranium*. L'argent ne satisfait à la loi qu'en prenant la moitié du poids atomique adopté par les chimistes, et le carbone qu'en doublant son poids atomique. Or, M. Regnault montre, par des motifs sérieux tirés des lois de la chimie et de la cristallographie, que les poids atomiques qui satisfont à la loi sont bien ceux qu'il faut préférer. Il fait voir aussi que les poids atomiques du potassium et du sodium, admis par les chimistes, sont deux fois trop forts.

898. Loi des chaleurs atomiques des corps composés. — On a cherché à établir relativement aux atomes des corps composés, une loi analogue à celle qui existe pour les corps simples. Les premiers essais dans cette voie paraissent avoir été faits par M. Avogadro, auquel on doit un travail considérable sur les chaleurs spécifiques des composés solides et liquides[1]. M. Newmann, vers la même époque, a mesuré la chaleur spécifique d'un grand nombre de substances minérales, et il a reconnu, sur quelques carbonates et quelques sulfates dont la base contient un atome d'oxygène, que, dans chacun de ces genres de sels, les chaleurs spécifiques sont en raison inverse des poids atomiques. C'est la loi de Dulong et Petit, appliquée à des composés de même formule chimique.

M. Regnault, en appliquant la méthode des mélanges (830) à un très grand nombre de substances composées, est arrivé aux lois suivantes :

1° *La chaleur spécifique des alliages, à une distance un peu grande de leur point de fusion, est la moyenne des chaleurs spécifiques des métaux qui les composent.* Il résulte de là que le produit de la chaleur spécifique par le *poids atomique moyen* (poids de l'atome de l'alliage divisé par le nombre d'atomes simples qui le composent) est constant, et égal à 41 environ; ce qui montre que chaque atome simple conserve sa même capacité en entrant dans la constitution

[1] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. LV et LVII.
[2] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. I, p. 129.

de l'alliage. Les alliages qui se trouvent près de leur point de fusion, à la température la plus élevée de l'expérience, donnent un produit beaucoup trop grand. Cela tient à ce qu'ils se ramollissent ou se désagrégent par la chaleur, ce qui augmente leur capacité d'une partie de la chaleur nécessaire pour produire leur fusion. Dans le tableau qui suit, les alliages de cette catégorie sont à la fin, et séparés des autres :

COMPOSITION de l'alliage.	CHALEUR spécifique observée c.	CHALEUR spécifique calculée.	POIDS atomique moyen p.	PRODUIT $p \times c$.
1 atome plomb, 1 atome étain.....	0,04073	0,04039	1014,9	41,34
1 id. 2 at. étain.......	0,04506	0,04161	921,7	41,53
1 id. 1 at. antimoine...	0,03880	0,03883	1050,5	40,76
1 atome bismuth, 1 atome étain...	0,04000	0,03987	1032,8	41,31
1 id. 2 at. étain......	0,04504	0,04415	933,7	42,05
1 at. bismuth, 2 at. étain, 1 at. antim.	0,04621	0,04564	901,8	41,67
1 id. 2 id. 1 id, 2 at. zinc	0,05657	0,05479	735,6	41,61
1 at. plomb, 2 at. étain, 1 at. bismuth	0,04476	0,04012	10[illegible]3,9	45,83
1 id. 2 id. 2 id.	0,06082	0,03785	1085,2	66,00
1 atome mercure, 1 atome étain....	0,07294	0,04172	1000,5	72,97
1 id. 2 at. étain......	0,06591	0,04563	912,1	60,12
1 id. 1 at. plomb.....	0,03827	0,03234	1280,1	48,99

2° *Dans tous les corps composés, de même composition atomique, et de constitution chimique semblable, les chaleurs spécifiques sont en raison inverse des poids atomiques.*

On entend par corps de constitution chimique semblable, ceux dont l'atome est formé d'un même nombre d'atomes de chaque espèce, quoique de natures différentes; tels que les composés RO et SO; RO^2 et SO^2,... dans lesquels R représente un atome de métal, O un atome d'oxygène, et S un atome de soufre. La loi de Dulong et Petit, et celle de Newmann, sont des cas particuliers de celle-ci. Cette loi se vérifie dans les mêmes limites que celle des corps simples. Les discordances ne dépassent pas généralement $\frac{1}{10}$, au plus $\frac{1}{9}$; elles proviennent des causes déjà indiquées à propos de la première loi. Les produits des capacités par les poids atomiques sont d'ailleurs d'autant plus prés d'être égaux que les substances comparées sont plus complètement *isomorphes*, c'est-à-dire cristallisent sous des formes plus rapprochées, et nous savons que la forme cristalline peut être différente à des températures différentes (I, 417). L'oxyde de zinc et l'alumine donnent des résultats qui ne s'accordent pas avec la loi, mais cela peut s'expliquer : nous avons vu que la capacité diminue quand on rapproche les molécules. Or, ces oxydes augmentent de densité quand on les calcine; de plus, ils dégagent alors de la chaleur au point de devenir incandescents, ce qui s'explique par la diminution qu'éprouve alors leur capacité, et ce qui montre qu'ils perdent une partie de la chaleur qu'ils contiennent.

En même temps, les propriétés chimiques de ces oxydes sont modifiées, car ils deviennent difficilement solubles dans les acides. Le soufre mou, obtenu en versant du soufre à 250° environ, dans de l'eau froide, présente un dégagement de chaleur analogue, quand on le porte à 90° environ. M. Regnault a vu la température du thermomètre de la corbeille P (*fig.* 660) monter jusqu'à 110°, et en même temps le soufre mou reprendre rapidement sa consistance ordinaire, ce qui n'a lieu spontanément qu'au bout de quelques jours. Il en faut conclure que la chaleur spécifique du soufre mou est plus grande que celle du soufre ordinaire, ce qui ne doit pas étonner après ce que nous avons dit des différentes capacités que peut présenter le soufre (891). Les changements de capacité qu'éprouvent les liquides avec la température, les rendent surtout impropres à la vérification de la loi. Nous voyons donc que la relation entre le poids atomique et la capacité est modifiée par diverses circonstances variables, dont l'influence est heureusement trop faible pour empêcher la loi de se dessiner nettement. Le tableau qui suit contient une partie des résultats trouvés par M. Regnault ; on y reconnaît la loi énoncée :

NOMS des substances.	CHALEURS spécifiques c.	POIDS ATOMIQUES adoptés p.	PRODUIT $p \times c$.
	Oxydes RO.		
Protoxyde de plomb fondu.	0,05089	1394,5	70,94
Oxyde de mercure.......	0,05179	1365,8	70,74
Protoxyde de manganèse..	0,15701	445,9	70,01
Oxyde de cuivre.........	0,14201	495,7	70,39
— de nickel calciné...	0,15885	469,6	74,60
Magnésie...............	0,24394	258,4	63,03
Oxyde de zinc..........	0,12480	503,2	62,77
	Oxydes R^2O^3.		
Fer oligiste............	0,16695	978,4	163,35
Acide arsénieux.........	0,12786	1240,1	158,56
Oxyde de chrôme........	0,17960	1003,6	180,01
— de bismuth	0,06053	2960,7	179,22
— d'antimoine........	0,09009	1912,9	172,34
Alumine (corindon)......	0,19762	642,4	126,87
— (saphir)........	0,21732	642,4	139,61
	Oxydes RO^2.		
Acide stannique..	0,09326	935,3	87,23
— titanique (artificiel).	0,17164	503,7	86,45
— — (rutile)....	0,17032	503,7	85,79
— antimonieux	0,09535	1006,5	95,92
	Oxydes RO^3.		
Acide Tungstique........	0,07983	1483,2	118,38
— Molybdique.......	0,13240	898,5	118,96
— silicique..........	0,19132	577,5	110,48
— borique	0,23743	436,0	103,52

NOMS des substances.	CHALEURS spécifiques c.	POIDS ATOMIQUES adoptés p.	PRODUIT $p \times c$.
	Sulfures RS.		
Protosulfure de fer	0,13570	510,4	73,33
Sulfure de nickel	0,12813	570,8	73,15
— de cobalt	0,12512	570,0	71,34
— de zinc	0,12303	604,4	74,35
— de plomb	0,05086	1495,6	76,00
— de mercure	0,05117	1467,0	75,06
Protosulfure d'étain	0,08375	936,5	78,34
	Sulfures R^2S^3.		
Sulfure d'antimoine	0,08403	2216,4	186,21
— de bismuth	0,06002	3264,2	195,90
	Sulfures RS^2.		
Pyrite de fer	0,13009	741,6	96,45
Bi-sulfure d'étain	0,11932	1137,7	135,66
Sulfure de Molybdène	0,12334	1001,0	123,46
	Sulfures R^2S.		
Sulfure de cuivre	0,12118	992,0	120,21
— d'argent	0,07460	1553,0	115,86
	Chlorures R^2Cl^2.		
Chlorure de sodium	0,21401	733,5	156,97
— de potassium	0,17295	932,5	161,19
Protochlorure de mercure	0,05205	2971,2	154,80
— de cuivre	0,13827	1234,0	156,83
Chlorure d'argent	0,09109	1794,2	163,42
	Chlorures RCl^2.		
Chlorure de barium	0,08957	1299,5	116,44
— de strontium	0,11990	989,9	118,70
— de calcium	0,16420	698,6	114,72
— de magnésium	0,19460	601,0	118,54
— de plomb	0,06641	1737,1	115,35
Perchlorure de mercure	0,06889	1708,4	117,68
Chlorure de zinc	0,13618	815,8	115,21
Protochlorure d'étain	0,10161	1177,9	119,59
Chlorure de manganèse	0,14255	788,5	112,51
	Chlorides volatils RCl^4.		
Chloride d'étain	0,14759	1620,5	239,18
— de titane	0,19145	1188,9	227,63
	Chlorides volatils R^2Cl^6.		
Chlorure d'arsenic	0,17604	2267,8	399,26
— de phosphore	0,20922	1720,1	359,86
	Bromures R^2Br^2.		
Bromure de potassium	0,11322	1468,2	166,21
— d'argent	0,07391	2330,0	173,31
— de sodium	0,13842	1269,2	175,65

NOMS des substances.	CHALEURS spécifiques *c*.	POIDS ATOMIQUES adoptés *p*.	PRODUIT *p*×*c*.
	Iodures R^2I^2.		
Iodure de potassium......	0,08191	268,2	164,38
— de sodium.......	0,08684	1869,2	162,30
Protoiodure de mercure...	0,03949	4109,3	162,24
Iodure d'argent..........	0,06159	2929,9	180,45
Protoiodure de cuivre.....	0,06869	2369,7	162,81
	Iodures RI^2.		
Iodure de plomb........	0,04267	2872,8	122,54
— de mercure......	0,04197	2844,1	119,36
	SELS.		
	Azotates Az^2O^5, R^2O.		
Azotate de potasse.......	0,23875	1266,9	302,49
— de soude........	0,27821	1067,9	297,13
— d'argent........	0,14352	2128,6	305,55
	Phosphates P^2O^5, $2R^2O$ (pyrophosphates).		
Phosphate de potasse.....	0,19102	2072,1	395,79
— de soude.......	0,22833	1674,1	382,22
	Sulfates SO^3, R^2O.		
Sulfate de potasse........	0,19010	1091,1	207,40
— de soude.........	0,23115	892,1	206,21
	Sulfates SO^3, RO.		
Sulfate de baryte........	0,11285	1458,1	164,54
— de strontiane	0,14279	1148,5	164,01
— de plomb.........	0,08723	1895,7	165,39
— de chaux	0,19656	857,2	168,49
— de magnésie......	0,22159	759,5	168,30
	Borates B^2O^6, R^2O.		
Borate de potasse........	0,21975	1461,9	321,27
— de soude.........	0,23823	1262,9	300,88
	Borates B^2O^6, $2R^2O$		
Borate de potasse........	0,20478	1025,9	219,52
— de soude...... ..	0,25709	826,9	212,60
	Carbonates CO^2, R^2O		
Carbonate de potasse....	0,21623	865,0	187,04
— de soude... ..	0,27275	666,0	181,65
	Carbonates CO^2, RO.		
Carb. de chaux (spath d'Isl.)	0,20858	631,0	131,61
Aragonite..............	0,20850	631,0	131,56
Marbre saccharoïde.......	0,21585	631,0	136,20
— — gris...	0,20989	631,0	132,45
Craie blanche..	0,21485	631,0	135,57
Carbonate de baryte.. . . .	0,11038	1231,9	135,99
— de strontiane..	0,14483	922,3	133,58
— de fer..	0,19345	714,2	138,16

899. Interprétation de la loi des chaleurs atomiques des corps composés. — M. Woestyn a fait une remarque importante[1] : c'est que l'état de combinaison ne change pas la capacité des atomes simples qui forment l'atome composé, ce que M. Regnault avait déjà remarqué sur les alliages. En effet, la chaleur spécifique de l'atome composé est égale à la somme des chaleurs spécifiques des atomes simples qui le constituent, de sorte que, si l'on désigne par $P, p, p', p''...$ les poids atomiques du composé et de ses éléments, par $C, c, c', c''...$ les chaleurs spécifiques, et par $n, n', n''...$ les nombres d'atomes simples qui entrent dans l'atome composé, on aura

$$P \cdot C = npc + n'p'c' + n''p''c'' + ...$$

Cette formule se vérifie dans les mêmes limites que la loi des chaleurs atomiques. Quand les composés contiennent des substances dont la capacité n'a pas été mesurée, on combine par addition et par soustraction les formules atomiques de différents composés, ainsi que les produits pc correspondants, et l'on trouve que les résultats sont les mêmes quand les formules résultantes sont identiques.

Il résulterait de là que, si les corps de même formule atomique conduisent sensiblement au même produit pc, ce n'est qu'un résultat accidentel tenant à ce que les produits qui correspondent aux corps simples sont les mêmes; mais souvent ce résultat est en défaut, et l'on remarque, comme on pouvait le prévoir, que les corps simples dont les produits sont les plus forts, communiquent aux composés dans lesquels ils entrent, des valeurs qui donnent des produits aussi plus forts que ceux des autres composés de formule similaire. Tels sont le mercure et le bismuth.

M. Garnier a fait une autre remarque qui permet d'interpréter la loi des chaleurs atomiques, d'une autre manière : il a trouvé que *les chaleurs spécifiques de tous les corps, simples ou composés, sont en raison inverse des poids atomiques moyens;* ainsi, l'eau étant formée de deux atomes d'hydrogène et d'un atome d'oxygène, son poids atomique moyen est $\frac{1}{3}$ 112,5 = 37,5, et le produit par sa chaleur spécifique 1 est aussi 37,5. En passant en revue les divers composés binaires dont la capacité a été déterminée par M. Regnault, M. Garnier a toujours trouvé sensiblement ce même nombre 37,5 pour le produit de la capacité par le poids atomique moyen, et ce nombre est le même que dans le cas des corps simples. Les différences trouvées par M. Regnault, dans la valeur du produit, quand on passe d'une classe de composés à une autre, proviennent de ce que le nombre d'atomes simples n'est pas le même. On voit donc de nouveau que les atomes simples conservent leur capacité quand ils entrent dans des combinaisons. Pour satisfaire à cette loi, il faut prendre pour poids atomique moyen de la potasse et de la soude, le poids atomique

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XXIII, p. 295.

absolu divisé par 3, ce qui suppose que ces corps sont composés de deux atomes de métal et d'un atome d'oxygène, comme M. Regnault l'avait déjà conclu en partant de la capacité de l'atome de ces métaux (897). Voici quelques-uns des résultats calculés par M. Garnier :

SUBSTANCES.	POIDS ATOMIQUE moyen p.	CHALEUR spécifique c.	PRODUIT $p \times c$.
RO — protoxyde de plomb..	697	0,051	435,5
R^2O^2 — oxyde de chrôme....	201	0,179	35,98
RS — sulfure de plomb.....	747	0,050	37,35
R^2S^3 — sulfure d'antimoine.	443	0,084	37,21
R^2S — sulfure d'argent......	517	0,074	38,25
RC^2l^2 chlorure de mercure..	736	0,052	38,27
RCl^2 chlorure de plomb.....	579	0,066	38,21
RBr^2 bromure de plomb....	757	0,053	40,12
R^2I iodure de mercure.......	1021	0,039	39,81
RI^2 iodure de mercure......	945	0,041	38,74

Les composés ternaires, les sels, ne paraissent pas soumis à cette loi, ou du moins ils s'en éloignent notablement. Est-ce que dans ces composés les atomes ne conserveraient pas la même capacité que lorsqu'ils sont isolés? ou bien l'eau interposée dans beaucoup de sels, et qu'on ne peut chasser toujours complètement, les incertitudes des méthodes de mesure, sont-elles les causes qui déguisent la loi? C'est ce qui ne peut être décidé dans l'état actuel de la science.

La loi en question est une conséquence de celle qu'a trouvée M. Woestyn ; en effet, la formule

$$PC = npc + n'p'c' + n''p''c'' + \ldots \quad \text{donne} \quad \frac{PC}{n + n' + n'' + \ldots} = ac,$$

en remarquant que les produits pc, $p'c'$, $p''c''$ ... sont égaux, d'après la loi de Dulong et Petit. Or, le premier membre n'est autre chose que le produit de la chaleur spécifique du composé par son poids atomique moyen, puisque $n + n' + n'' + \ldots$ représente la somme des atomes simples composants.

Enfin, le résultat trouvé par M. Garnier peut servir à démontrer que les volumes égaux des gaz simples sous la même pression et à la même température, contiennent le même nombre d'atomes (880). En effet, la loi n'est satisfaite qu'en prenant pour les nombres d'atomes simples qui constituent l'atome composé, des nombres entre eux comme les volumes des gaz qui se combinent. Ainsi, l'eau étant formée de deux volumes d'hydrogène et d'un volume d'oxygène, il faut admettre que l'atome d'eau est formé de deux atomes d'hydrogène et d'un atome d'oxygène, pour que son poids atomique moyen satisfasse à la loi. Voilà donc une preuve nouvelle et inattendue d'un des principes les plus importants de la chimie.

§ 2 — CHALEUR SPÉCIFIQUE DES GAZ.

900. Les gaz étant soumis à des lois simples quand on considère leurs volumes, on a été conduit naturellement à rapporter leur capacité au volume et non plus à la masse ; et l'on définit la chaleur spécifique d'un gaz sous une certaine pression, *la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1° l'unité de volume de ce gaz.* La découverte des lois de la capacité des atomes a donné une plus grande importance encore à cette manière de considérer les chaleurs spécifiques des gaz. Du reste, il est toujours facile, étant donnée la quantité q de chaleur absorbée par l'unité de volume d'un gaz pour que sa température s'élève de 1°, d'en déduire la quantité c qui serait absorbée par l'unité de poids du même gaz. En effet, si v est le volume dont le poids est égal à 1, on aura $c = qv$, et si d est la densité du gaz, on a $1 = vd$, et par conséquent, $c = q : d$.

Chaleur spécifique à volume constant et à pression constante. — Cela posé, il y a deux manières de considérer les chaleurs spécifiques des gaz rapportées aux volumes : ou bien le gaz qui s'échauffe peut se dilater librement en conservant sa pression, et alors sa capacité se nomme *chaleur spécifique à pression constante* : ou bien il ne peut se dilater, et est forcé de conserver son même volume en augmentant nécessairement de force élastique, et alors sa capacité se nomme *chaleur spécifique à volume constant.* On a cru longtemps que la première de ces capacités surpassait la seconde de toute la quantité de chaleur nécessaire pour produire la dilatation du gaz, quantité qui ne serait pas absorbée quand le volume ne peut varier. Nous reviendrons sur ce point (910).

On a fait depuis un siècle un grand nombre d'expériences sur les capacités des gaz. Lavoisier et Laplace, en 1784, employèrent leur calorimètre; ils faisaient passer lentement un volume connu de gaz chaud dans un serpentin entouré de glace, et mesuraient la quantité de glace fondue. Ils n'opérèrent que sur l'air et l'oxygène. Crawfort, en 1788, se servait de la méthode des mélanges; il plongeait dans une masse d'eau aussi petite que possible un vase en cuivre mince porté à 100° et contenant un gaz, dont la masse était trop faible pour qu'on pût arriver à des résultats même approximatifs. Leslie s'est appuyé sur l'échauffement qu'éprouve l'air raréfié quand il est comprimé par un gaz qui se précipite dans l'espace qu'il occupe. Gay-Lussac faisait arriver dans un même récipient, de l'air et un autre gaz à des températures différentes, et trouvait le rapport entre les capacités de ces gaz en employant le calcul que l'on suit dans la méthode des mélanges. Dalton, Clément et Désormes, Haycrafft, Dulong, se sont aussi occupés du même sujet.

901. Expériences de Delaroche et Bérard. — La plus grande difficulté que l'on rencontre dans les recherches sur les capacités des gaz,

provient de leur faible masse, et, par suite, de l'importance relative des corrections à apporter aux données de l'expérience. MM. Delaroche et Bérard, dans un grand et beau travail publié en 1812, et couronné par l'Académie des sciences de Paris, sont parvenus à vaincre en grande partie ces difficultés, à force de soins, et en employant une disposition d'appareil très ingénieuse. Le gaz traversait, avec une vitesse constante, un serpentin entouré d'eau, à laquelle il cédait une partie de sa chaleur. Il entrait à une température connue, et le développement du serpentin était assez grand pour qu'il sortît toujours avec la température de l'eau.

La *fig.* 663 représente l'appareil. Le calorimètre S, contenant le serpentin formé d'un tube aplati, est soutenu par un support assez mince pour qu'il ne puisse lui enlever qu'une quantité imperceptible de chaleur. L'écoulement constant du gaz est obtenu par un moyen déjà décrit (I, 370); ce gaz est contenu dans des vessies renfermées elles-mêmes dans deux ballons B, B' de 40 litres. Chaque ballon communique avec un réservoir *m*, *n*, rempli d'air, et dans lequel on peut faire arriver de l'eau avec une vitesse constante, au moyen de vases de Mariotte V. La communication est établie par des tubes qui se divisent en deux branches munies de robinets, dont l'une plonge jusqu'au fond du réservoir *m*, *n*. Les vessies peuvent être mises en communication avec l'orifice supérieur ou l'orifice inférieur du serpentin S, par un système de tubes munis de robinets. Si la vessie B est pleine de gaz, on fait fonctionner le vase de Mariotte qui est du même côté; le gaz refoulé traverse les tubes M, *r*, et entre par le bas du serpentin; les robinets convenables étant ouverts et les autres fermés. Le gaz sort par la partie supérieure du serpentin et se rend dans la vessie du ballon B', la gonfle, et l'air refoulé passe dans le réservoir *n* à travers l'eau qu'il contient, et presse ce liquide de manière à le chasser, par le tube *t*, dans le vase *v*. La colonne d'eau contenue dans le tube *t* fait équilibre à la pression de la colonne d'eau du vase de Mariotte, de manière que la régularité d'écoulement du gaz qui traverse le serpentin n'est pas modifiée par son arrivée dans la vessie du ballon B', et ce gaz circule sous une pression égale à celle de l'atmosphère augmentée de la colonne d'eau *t*. Quand cette vessie est pleine, on ferme les robinets qui étaient ouverts, et l'on ouvre les autres; on fait fonctionner à son tour le vase

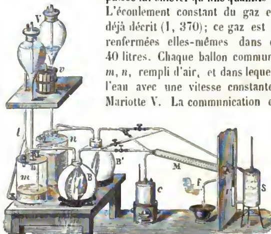


Fig. 663.

de Mariotte qui est du côté du ballon B', le gaz en est chassé, et, traversant l'un des tubes à robinet qui se croisent au milieu de la figure, passe en M, puis en *r*, entre dans le serpentin, et vient se rendre, par l'autre tube croisé, dans la vessie du ballon B. L'eau du réservoir *m* monte en même temps dans le vase *v*. Pendant ce temps-là, on remplit d'eau le vase de Mariotte qui ne sert pas. En faisant ainsi fonctionner alternativement, et sans interruption sensible, les deux vases de Mariotte, on peut obtenir un courant constant de gaz dans le serpentin, aussi longtemps que l'on veut. Le gaz s'échauffe, en traversant un manchon M, dans lequel on fait circuler de la vapeur d'eau, venant d'une petite chaudière *c* et sortant par le tube *f*. La température du gaz est donnée par un thermomètre placé dans le tube *r* que le gaz traverse[1]. Le calorimètre S est, d'ailleurs, dans une chambre séparée de celle qui contient le reste de l'appareil. Il est à remarquer que les gaz sont humides, ce qui modifie un peu leur chaleur spécifique, qui diffère de celle de la vapeur d'eau. De plus, il y a de la chaleur cédée par conductibilité au calorimètre par le tube *r*, et d'autre par le rayonnement de l'extrémité du tube M. En formant le tube *r* en verre, et disposant des écrans convenables, on rendait l'erreur négligeable.

902. Capacité des gaz par rapport à l'air. — Delaroche et Bérard ont d'abord cherché le rapport entre les chaleurs spécifiques des divers gaz. Pour cela, ils faisaient passer un courant de gaz, avec une vitesse constante, à travers le serpentin, jusqu'à ce que la température du calorimètre devînt stationnaire, ce qui avait toujours lieu au bout d'un certain temps, car la perte par l'extérieur augmente avec la température du calorimètre (748), tandis que la chaleur cédée dans le même temps par le gaz va en diminuant. Il arrive donc un moment où la quantité de chaleur cédée par le gaz est égale à celle que perd le calorimètre. La température finale et stationnaire qui a lieu alors, est donnée par un thermomètre dont le réservoir occupe toute la profondeur du bain ; de plus, le gaz chaud entrant par le bas, les couches inférieures de l'eau sont le plus échauffées, ce qui détermine des courants qui mélangent le liquide.

Pour abréger les expériences, on portait le calorimètre, au moyen d'une lampe à esprit de vin, à peu près à la température à laquelle il devait s'arrêter. Comme, dans le voisinage du maximum de température, les variations sont extrêmement lentes, on observait ces variations de 10 minutes en 10 minutes, et quand elles étaient très petites, on échauffait le calorimètre au-dessus du maximum, puis on observait la marche du refroidissement, et quand les variations étaient très faibles, on arrêtait l'expérience. On prenait pour température stationnaire la moyenne entre les deux indications, très voisines du maximum, ainsi observées. Une expérience semblable était faite ensuite sur un autre gaz,

[1] Le thermomètre est toujours un peu trop bas, à cause de la chaleur qu'il rayonne vers le manchon, qui est refroidi par le contact de l'air extérieur. Comme, d'un autre côté, la température du gaz est un peu inférieure à celle de la vapeur du tube M, on prenait pour température de ce gaz, la moyenne entre celle de l'eau bouillante et celle du thermomètre *r*.

et le rapport des capacités des deux gaz s'obtenait en exprimant que les quantités de chaleur cédées dans l'unité de temps au calorimètre, quantités qui sont égales à celles qui se perdent, sont entre elles comme les excès de température sur l'air ambiant; car la loi de Newton peut s'appliquer ici. Si donc T est la température du gaz à son entrée dans le serpentin, x sa capacité, v sa vitesse, ou le volume qui passe dans l'unité de temps ; θ la température finale du calorimètre; T', x', v', θ' les mêmes quantités pour l'autre gaz, et enfin t, t' les températures de l'air ambiant, on aura $vx(T-\theta) : v'x'(T'-\theta') = (\theta-t) : (\theta'-t')$, d'où l'on tirera le rapport $x : x'$.

Delaroche et Bérard ont employé une seconde méthode, qui consiste à comparer les volumes de gaz qui élèvent d'une quantité donnée la température du calorimètre dans les mêmes circonstances, et à prendre le rapport inverse de ces volumes, pour le rapport des capacités. Pour se mettre à l'abri des erreurs provenant de la perte de chaleur du calorimètre, ils ont appliqué la méthode de compensation de Rumfort (887), en donnant d'abord au calorimètre une température inférieure à celle de l'air ambiant.

903. Capacité des gaz par rapport à l'eau. — Les deux méthodes précédentes ayant donné les rapports entre les capacités des gaz et la capacité de l'air, il restait, pour obtenir ces capacités par rapport à l'eau, à déterminer la chaleur spécifique de l'air par rapport à ce liquide. Delaroche et Bérard ont employé pour cela trois méthodes différentes.

1° On calcule la quantité de chaleur Q que perd le calorimètre pendant une minute, quand sa température est stationnaire, et on l'égale à la quantité de chaleur $vx(T-\theta)$ cédée par l'air au calorimètre pendant le même temps; ce qui donne une équation d'où l'on tire x.

Pour déterminer la valeur de Q, supposons que le passage du gaz étant supprimé, on laisse refroidir l'appareil, et que V soit la vitesse du refroidissement, c'est-à-dire l'abaissement de température pendant une minute. Si P est le poids de l'eau augmenté de l'équivalent en eau des masses métalliques du calorimètre, la quantité de chaleur perdue par l'appareil pendant une minute sera $Q = PV$.

Il reste à calculer la valeur de V. Pour cela, on observe l'abaissement de température pendant m minutes, à partir du moment où la température du calorimètre étant stationnaire et supérieure de $t°$ à la température ambiante, on a arrêté le passage du gaz. L'excès de température t' après m minutes sera (781) $t' = ta^m$. En différentiant, on aura pour V,

$$V = \frac{dt'}{dm} = t \log a. \qquad [1]$$

Pour obtenir $\log a$, on prend les logarithmes dans $t' = ta^m$, ce qui donne

$\log a = \frac{1}{m} \log \frac{t'}{t}$, équation dans laquelle t', t et m sont connus par l'observation. On a donc, pour trouver la capacité x de l'air,

$$vx(T - \theta) = t \log a.$$

Le même procédé pourrait servir à mesurer directement la capacité, par rapport à l'eau, d'un gaz autre que l'air.

2° On fait passer très lentement un courant constant d'eau à travers le serpentin du calorimètre, jusqu'à ce que sa température devienne stationnaire. L'eau vient d'un vase de Mariotte V (*fig.* 664) ; elle s'échauffe dans un tube T, autour duquel circule de la vapeur d'eau, et sort de la partie supérieure du serpentin par un tube effilé *e* qui la verse dans une éprouvette graduée servant à faire connaître la vitesse. La température de l'eau à son entrée, est donnée par trois thermomètres placés à des hauteurs différentes dans le tube *t*. On compare ensuite les chaleurs spécifiques de l'eau et de l'air, par le calcul du n° 901.

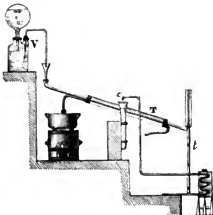


Fig. 664.

3° **Mesure directe de la capacité de l'air par rapport à l'eau.** — La troisième méthode, employée aussi par Rumfort, qui a imaginé le calorimètre à serpentin, donne directement la capacité par rapport à l'eau. Le gaz circule dans le serpentin avec une vitesse constante, et élève la température du calorimètre depuis $t°$ jusqu'à $\theta°$; entré à une température T, il sort avec une température toujours égale à celle du serpentin, et qui varie d'une manière continue, de $t°$ à $\theta°$. On peut supposer que ce gaz sort à une température constante égale à la moyenne $\frac{1}{2}(t + \theta) = t'$, de sorte que sa température s'abaisse de $(T - t')°$. Soit V le volume de gaz écoulé, x sa capacité, P les poids du calorimètre en eau et de l'eau qu'il contient ; on aura, pour déterminer x, l'équation

$$xV(T - t') = P(\theta - t).$$

On commence l'expérience au-dessous de la température ambiante, et on la termine quand le calorimètre s'élève au-dessus, d'un même nombre de degrés, pour éviter l'erreur provenant de l'action du milieu ambiant. Comme le gaz se refroidit dans le calorimètre, d'une quantité à peu près constante pendant toute la durée de l'expérience, parce que θ diffère peu de t, on voit que le temps pendant lequel le calorimètre est au-dessous de la température ambiante, est

sensiblement égal à celui pendant lequel il la dépasse ; il y a donc compensation presque exacte.

Correction pour les pressions. — L'état de compression des gaz ayant évidemment une influence sur leur chaleur spécifique rapportée aux volumes, pour rendre les résultats comparables, il faut les ramener à la même pression. Delaroche et Bérard ont employé la marche suivante : ayant mesuré les capacités x et x' de l'air sous des pressions p et p', l'une supérieure et l'autre inférieure à 760^{mm}, en changeant convenablement la hauteur des vases de Mariotte V ou celle du tube t (*fig.* 663), ils ont calculé le rapport $r = \frac{x' - x}{x} : \frac{p' - p}{p}$, et l'ont supposé constant pour tous les gaz, dans les limites des variations de la pression atmosphérique. Alors, x étant mesuré sous la pression p, ils en concluaient la valeur de x' sous la pression p', qu'ils prenaient égale à 760^{mm}.

904. Résultats. — Delaroche et Bérard ont trouvé, par les méthodes qui précèdent, des valeurs différentes pour les capacités des gaz sous le même volume et sous la même pression. Rapportées aux poids, les capacités diffèrent encore davantage. Voici les résultats trouvés :

GAZ SIMPLES ou mélangés.	CHALEURS SPÉCIFIQUES en volume comparé à l'air.	en poids comparé à l'air.	en poids comparé à l'eau.
Air	1,0000	1,0000	0,2669
Oxygène	0,9765	0,8848	0,2361
Hydrogène	0,9033	12,3401	3,2936
Azote	1,0000	1,0318	0,2754
GAZ COMPOSÉS.	—	—	—
Acide carbonique	1,2583	0,8280	0,2210
Protoxyde d'azote	1,3503	0,8878	0,2369
Gaz oléfiant	1,5530	1,5763	0,4207
Oxyde de carbone	1,0340	1,0805	0,2884

Lors des travaux dont nous venons de parler, la loi des chaleurs atomiques n'avait pas encore été découverte. Dulong et Petit ont remarqué qu'elle s'applique aux gaz simples qui figurent dans le tableau qui précède ; car leurs chaleurs spécifiques, considérées sous le même volume, sont égales dans les limites des erreurs des observations ; d'où l'on conclut que les capacités des atomes sont égales, puisqu'il y a le même nombre d'atomes sous le même volume pris à la même pression et à la même température. Ce résultat peut aussi être regardé comme une nouvelle confirmation de cette dernière loi, si l'on admet que celle des chaleurs atomiques s'étend aux gaz simples.

905. Malgré l'habileté avec laquelle avaient été conduites les expériences, la méthode de Delaroche et Bérard comportait quelques causes d'erreur qu'ils n'avaient pu éviter; par exemple, les gaz étaient humides, et il s'y mêlait de l'air, par endosmose, à travers les parois des vessies; de plus, le thermomètre, à l'époque où ils opéraient, était loin de donner des indications bien exactes. C'est pourquoi on a fait depuis de nombreuses recherches sur les capacités des gaz. M. Haycraft a expérimenté au moyen d'un appareil analogue à celui de Delaroche et Bérard; seulement les gaz qu'il voulait comparer étaient introduits, aprés avoir été desséchés, dans deux cylindres, munis de pistons, qui les chassaient dans deux calorimétres identiques.

MM. Apjohn et Suerman, chacun de leur côté, ont aussi mesuré les capacités de divers gaz en partant du froid produit par un courant de gaz sec passant sur la boule d'un thermométre mouillé [1]. Le principe de cette méthode, sur laquelle nous reviendrons dans l'hygrométrie, n'est autre que celui dont on se sert pour apprécier l'état d'humidité de l'air, au moyen d'un thermomètre mouillé (1164).

906. Expériences de MM. de la Rive et Marcet. — MM. de la Rive et Marcet ont fait de nombreuses expériences sur les capacités des gaz, par la méthode du refroidissement. D'abord, ils renfermaient un volume constant de gaz dans un ballon en verre mince, ce qui ne leur donna aucun bon résultat. Vers 1835, ils ont fait de nouvelles expériences par un procédé que Dulong avait aussi imaginé de son côté, et qui offre beaucoup de garanties d'exactitude [2]. L'appareil consiste en un calorimétre cylindrique *v* (*fig.* 665) en cuivre trés mince, de 37^{mm} de hauteur, et de 33^{mm} de largeur, traversé par un petit serpentin en cuivre dont les extrémités reçoivent deux tubes de verre *t*, *t'*, qui communiquent avec des gazomètres. Un thermomètre est placé au milieu du vase *v*. Ce vase est suspendu, par les tubes *t*, *t'* et par la tige du thermométre, au centre d'un ballon en cuivre B noirci en dedans, dans lequel on peut faire le vide par le tube *r*.

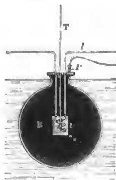


Fig. 665.

Voici maintenant comment on opére : l'appareil est placé dans une vaste salle dont la température est constante, et le vase *v* est rempli d'essence de térébenthine, dont la capacité est environ moitié moindre que celle de l'eau, afin de rendre les changements de température plus sensibles. On échauffe le vase *v*, et on le dispose dans la sphère noircie, dans laquelle on fait le vide, et qu'on plonge ensuite dans un bain d'eau à la température ambiante.

[1] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. XXVI et LXIII.

[2] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. LXXV, p. 119.

On observe alors le temps que met le thermomètre t à baisser de 15° ou 20°. On répète ensuite cette expérience dans les mêmes conditions, mais en faisant passer dans le serpentin, un courant régulier d'air sec à la température ambiante. Alors la vitesse du refroidissement du vase v est due en partie à la soustraction par l'air qui passe d'une certaine quantité de chaleur. On fait enfin une troisième expérience, en faisant circuler le gaz, bien sec, dont on veut comparer la capacité à celle de l'air. On a soin, en réglant un robinet, de donner la même vitesse aux deux gaz. Les volumes des gaz qui ont parcouru l'appareil sont mesurés dans le gazomètre qui les reçoit. Pour passer des données des expériences, au rapport des capacités, on emploie la méthode de calcul suivante, qui a été indiquée par Dulong.

Désignons par R la vitesse du refroidissement dû au rayonnement seul; par v et v' les vitesses produites par l'air seul et par le gaz seul; on aura évidemment $v = V - R$, $v' = V' - R$. D'un autre côté, les vitesses v et v' sont proportionnelles aux capacités des gaz et aux volumes U, U', qui passent dans l'unité de temps, en partant d'un même excès initial t du calorimètre. On a donc, en appelant c, c' les capacités des deux gaz,

$$v : v' = Uc : U'c', \quad \text{d'où} \quad c : c' = U'v : Uv' = U(V-R) : U'(V'-R). \quad [2]$$

Les excès de température ne dépassant pas 10° à 12°, les vitesses R, V, V' se calculent au moyen de la formule [1] du n° 937; qui donne $R = t \log a$, $V = t \log a'$, $V' = t \log a''$, expressions dans lesquelles on a (903)

$$\log a = \frac{1}{m} \log \frac{t'}{t}, \quad \log a' = \frac{1}{m'} \log \frac{t''}{t}, \quad \log a'' = \frac{1}{m''} \log \frac{t'''}{t};$$

t', t'', t''' étant les excès observés après des nombres de minutes représentés par m, m', m''. L'équation [2] devient alors, en faisant toutes les substitutions,

$$x : x' = U' \left[t \left(\frac{1}{m'} \log \frac{t''}{t} - \frac{1}{m} \log \frac{t'}{t} \right) \right] \; U \left[t \left(\frac{1}{m''} \log \frac{t'''}{t} - \frac{1}{m} \log \frac{t'}{t} \right) \right].$$

Si l'on suppose que les trois expériences, commencées avec un même excès t, soient terminées, comme l'ont fait MM. de la Rive et Marcet, lorsque les excès sont devenus les mêmes, t', la formule devient, en remplaçant t'' et t''' par t',

$$\frac{x}{x'} = \frac{U'}{U} \cdot \frac{m - m'}{m - m''} \cdot \frac{m''}{m'}, \quad \text{ou enfin} \quad \frac{x}{x'} = \frac{u'}{u} \cdot \frac{m - m'}{m - m''},$$

en appelant u et u' les volumes de gaz qui ont parcouru le serpentin pendant les temps m' et m'', ce qui donne $U = u : m'$, et $U' = u' : m''$, puisque la

vitesse est uniforme. Sous la dernière forme, la formule ne contient que des valeurs données directement par l'observation.

MM. de la Rive et Marcet ont trouvé, par cette méthode, la même capacité pour l'air, l'oxygéne et l'hydrogéne.

907. Expériences de Dulong. — A la même époque, Dulong étudiait la capacité des gaz, par une méthode semblable à celle que nous venons d'exposer. Le travail de cet éminent physicien n'a pas été publié; on a seulement trouvé dans les notes qu'il a laissées, l'énoncé des lois suivantes :

1° *Les gaz composés formés de gaz simples qui, dans leur réunion, ne sont pas condensés, ont même chaleur spécifique rapportée au volume, que les gaz simples;* d'où l'on doit conclure que la chaleur spécifique des gaz combinés est la même que s'ils étaient simplement mélangés. Nous avons constaté un résultat semblable pour les corps solides (933).

2° *Les gaz composés, dans la formation desquels il y a eu une même condensation des gaz constituants, ont des chaleurs spécifiques égales quoique très différentes de celles des gaz simples.* On ne peut que regretter que les détails du travail de Dulong n'aient pas été retrouvés aprés sa mort.

908. Expériences de M. Regnault. — M. Regnault a fait connaître, en 1853, les résultats de recherches poursuivies pendant plus de quinze années, sur les capacités calorifiques des gaz[1]. Après avoir suivi d'abord la méthode de MM. de Larive et Marcet, il a adopté définitivement celle de Delaroche et Bérard, mais en perfectionnant considérablement les appareils, et en prenant une foule de précautions qui lui ont permis d'obtenir des résultats plus certains.

La *fig.* 666 représente l'ensemble de l'appareil employé. Le gaz, desséché et purifié, était refoulé par le tube *n*, au moyen d'une machine de compression, dans un réservoir en cuivre R, de 35 litres de capacité. Ce réservoir communiquait par le tube *m* avec le manométre à air libre qui avait servi à M. Regnault dans ses expériences sur la loi de Mariotte (I, 322); et il était plongé dans une grande masse d'eau, agitée au moyen de lames annulaires, L, et dont le gaz prenait la température. Quand on ouvrait le robinet *r*, ce gaz passait par les tubes *t*, *t'*, *t"*, dans un serpentin S, où il s'échauffait. Ce serpentin était plongé dans un bain d'huile entretenu à une température constante par une lampe à alcool ou une lampe à gaz, et régulièrement agité par les pièces *aa* menées par une machine à vapeur. Du serpentin, le gaz passait dans le calorimétre *c*, dont il sortait par le tube *s*, aprés en avoir pris la température; ce que l'on vérifiait au moyen d'un thermométre engagé dans le tube *s*.

Calorimètre. — Le calorimètre est représenté à part dans la *fig.* 667; il est protégé contre le refroidissement par une enveloppe en laiton poli en dedans, *ee*, fermée en dessus pour empêcher l'évaporation, et dans laquelle il

[1] *Comptes-rendus de l'Acad. des sc.* de Paris, t. XXXVI, p. 676; *Mémoires de l'Institut* (Académie des sciences), t. XXVI; et *Relation des expériences sur les données*, etc., nécessaires au calcul des machines à feu, t. II, p. 41.

s'appuie sur des cônes en liége. L'eau qu'il contient est agitée régulièrement par les piéces a, a (*fig.* 667), dont une régle fixe, l (*fig.* 666), dirige le mouvement. Le gaz arrive d'abord dans le vase v (*fig.* 667), et passe successivement dans des boîtes α, β, γ, dans lesquelles des cloisons en spirale, représentées à part en A, le forcent à circuler; il entre par l'extrémité extérieure de la spirale pour sortir par le centre, ou *vice versâ*.

Quand le gaz attaquait le cuivre, le serpentin S (*fig.* 666) était en platine, ainsi que le vase v (*fig.* 667), qui était surmonté d'un serpentin de même métal remplaçant les boîtes α, β, γ.

Le poids de l'eau du calorimétre se déduisait de son volume mesuré dans un ballon à col étroit, jaugé exactement à 4°. Quoique l'eau ne fût pas à cette

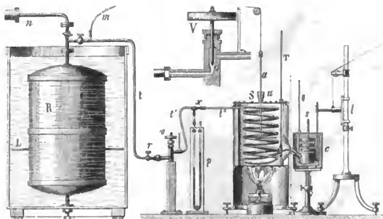


Fig. 666.

température, on calculait son poids comme si elle eût été à 4°, parce que la capacité calorifique de l'eau augmentant un peu avec la température, il y avait sensiblement compensation entre cet accroissement et la diminution de la valeur du poids, quand la température augmentait.

A son entrée dans le calorimétre, le gaz devait posséder la température du serpentin S, qui avait 10ᵐ de longueur. M. Regnault s'en est, du reste, assuré directement, en soudant en σ (*fig.* 667) un tube vertical contenant un thermomètre t, autour du réservoir duquel le gaz circulait avant de sortir en d. Pour éviter le refroidissement dans le passage à travers le tube d, ce tube était protégé par un renflement du réservoir à huile, ayant une section elliptique à grand axe vertical, puis enveloppé d'un bouchon en liége, qui servait en même temps à l'ajuster à un tube en verre adapté au vase v. Malgré ces précautions, il se perd un peu de chaleur dans le passage en d; mais cette perte devient

insensible, quand la vitesse du gaz est suffisamment grande ; car les résultats obtenus restent alors les mêmes, tandis qu'ils vont en croissant avec la vitesse, quand elle est au-dessous d'une certaine limite.

Si le gaz augmentait sensiblement de volume, par son expansion propre, en entrant dans le calorimètre, il en résulterait un refroidissement difficile à apprécier. M. Regnault a reconnu, en faisant communiquer les tubes *d* et *s* avec des manomètres à eau, que la différence des pressions dans ces deux tubes n'était que de 1mm d'eau, d'où il ne pouvait résulter aucun effet calorifique sensible.

Vitesse du gaz.— Il était nécessaire, pour la régularité de l'échauffement du calorimètre, que le gaz traversât l'appareil avec une vitesse constante. Quand on voulait opérer sous la pression atmosphérique, on rendait la vitesse constante, malgré la diminution de pression dans le réservoir R, en gênant plus ou moins le passage du gaz, au moyen d'une vis *v* (*fig.* 666), représentée à part en V; elle traversait une boîte à étoupes qui empêchait les fuites de gaz, et son extrémité inférieure était terminée en cône, et fermait plus ou moins l'ouverture *o*. Le tube *t'* était très large, et il y avait en *x* une partie très étroite, de manière que la pression était toujours moindre en *t"* qu'en *t'*, où elle était mesurée par un manomètre à eau *p*. En faisant en sorte que la tension restât constante en *p*, on rendait la vitesse constante en *t"* et dans tout l'appareil. Pour cela, on faisait tourner, à la main, la vis V, *v*, tout en observant le manomètre *p*. La vis porte une large tête divisée, qui aidait à en suivre le mouvement. Quant à la différence de pression en *t'* et en *t"*, on l'établissait au moyen du robinet *r*, et en relevant plus ou moins la vis en commençant.

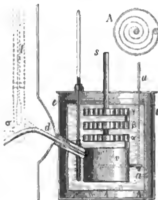


Fig. 667.

Quand le gaz devait circuler sous une pression plus grande que celle de l'atmosphère, le tube *s* était terminé par une ouverture étroite ; la partie rétrécie *x* était supprimée, de manière que le gaz se détendait en passant par l'ouverture *o* et possédait dans le reste de l'appareil une pression supérieure à celle de l'atmosphère, donnée par le manomètre *p*, dans lequel l'eau était alors remplacée par du mercure.

A la fin de chaque expérience, il fallait connaître la masse du gaz qui avait traversé le calorimètre. Cette masse se déduisait de la diminution de pression en R. Pour cela, on mettait le réservoir R en communication avec un ballon à robinet, et l'on pesait le gaz qui remplissait le ballon, avec toutes les précautions employées pour les mesures des densités des gaz (879). En même temps, on observait quelle diminution de pression avait produite la sortie de ce gaz.

Supposons d'abord la loi de Mariotte exacte, et que le volume V du réservoir soit invariable. Soient H et H' les pressions en R, avant et après la sortie du gaz dont d est la densité à 0° et sous la pression de 760^{mm}, les poids de gaz, contenus dans le réservoir, sous les pressions H et H', seront $P = \frac{VdH}{760(1+\alpha t)}$, et $P' = \frac{VdH'}{760(1+\alpha t)}$, en représentant par α le coefficient de dilatation de l'air. La différence de ces poids est égale au poids p du gaz introduit dans le ballon; on a donc

$$p = Vd\,\frac{(H - H')}{760(1+\alpha t)}. \qquad [1]$$

La valeur de p étant connue, on calcule la valeur du produit Vd, et la formule sert ensuite à calculer p pour un abaissement de pression $H - H'$.

La loi de Mariotte n'est pas exacte, et le volume V du réservoir change avec la pression. Mais comme les effets qui résultent de là sont très faibles, on peut toujours représenter le poids du gaz qui remplit le récipient à 0°, par une formule empirique $P_0 = aH + bH^2 + cH^3$; d'où l'on déduit le poids à la température t, en divisant par $1+\alpha t$. Retranchant l'un de l'autre les poids P, P' qui correspondent aux pressions H et H', il vient

$$p = \frac{a(H-H') + b(H^2 - H'^2) + c(H^3 - H'^3)}{1+\alpha t},$$

formule qui donne le poids p du gaz recueilli dans le ballon à densités, quand la pression passe de H à H'. Pour déterminer les constantes a, b, c, on fait trois expériences semblables sous des pressions H très différentes; on a ainsi trois valeurs de p, et par suite trois équations de condition, au moyen desquelles on calcule les trois constantes.

Mode d'expérience. — Désignons par P le poids du gaz qui a traversé l'appareil, par T sa température à son entrée dans le calorimètre, par t et θ les températures initiale et finale de ce dernier; la quantité de chaleur abandonnée par le gaz sera $Px[T - \frac{1}{2}(t+\theta)]$. Or, le calorimètre reçoit, outre cette quantité, de la chaleur venant de l'extérieur. Désignons par r l'élévation de température produite par cette chaleur étrangère pendant la durée de l'expérience, par p l'équivalent en eau du calorimètre, en remplaçant la température finale θ par $\theta - r$, on aura

$$Px[T - \tfrac{1}{2}(t+\theta)] = p[(\theta - r) - t]. \qquad [1]$$

Voici maintenant comment on procède pour évaluer la quantité r. Cette variation de température provient : 1° de la chaleur rayonnée par les écrans, et de celle qui passe par conductibilité à travers le tube d (*fig.* 666); les changements de température du calorimètre étant négligeables par rapport à T,

qui est relativement très grand, on peut regarder comme constant l'échauffement par minute provenant de ces causes ; désignons-le par k. 2° Il y a à considérer l'action du milieu ambiant, qui est proportionnelle à la différence de température $(\tau' - \tau)$ de l'air et du calorimètre. L'échauffement par minute sera donc

$$m = C(\tau' - \tau) + k. \qquad [2]$$

C et k sont des constantes qu'il faut déterminer.

Pour cela, le gaz étant préparé, la température T de l'huile du réservoir S parfaitement établie, on observe pendant 10^{min} les variations de température du calorimètre et de l'air. Si τ' et τ sont les moyennes observées, c'est-à-dire les sommes de ces températures divisées par 10, l'équation [2] exprimera la variation de température pour une minute, et fournira une première équation de condition pour déterminer les constantes C et k. Les observations destinées à donner l'autre constante se feront après l'expérience calorifique, à laquelle on procède immédiatement à la fin de la 10e minute.

On fait donc passer le gaz, et l'on observe encore, de minute en minute, les températures du calorimètre et de l'air. En désignant par t'_1, t_1; t'_2, t_2; t'_3, t_3;... les moyennes températures pendant chaque minute, les échauffements dus aux causes extérieures seront, pendant les minutes successives,

$$m_1 = C(t'_1 - t_1) + k; \quad m_2 = C(t'_2 - t_2) + k; \quad m_3 = C(t'_3 - t_3) + k; \ldots$$

Au bout de n minutes, on arrête le passage du gaz, et l'échauffement r produit pendant les n minutes par les causes extérieures sera

$$[3] \quad r = m_1 + m_2 \ldots + m_n = C(t'_1 + t'_2 \ldots + t'_n - t_1 - t_2 \ldots - t_n) + nk.$$

Pour avoir une seconde équation de condition destinée à trouver les constantes, on observe comme avant le passage du gaz, à la fin de la n^e minute, la marche des thermomètres pendant 10^{min} ; on déduit de ces observations, l'échauffement m dû aux causes extérieures pendant une minute, et en désignant par τ_1', τ_1 les moyennes des températures de l'air et du calorimètre observées pendant ces 10^{min}, on aura

$$m = C(\tau'_1 - \tau_1) + k,$$

équation qui, avec [2], servira à trouver les valeurs de C et k. Ces valeurs une fois connues, l'équation [3] donnera la valeur de r, qu'il n'y aura plus qu'à porter dans l'expression [1] ; d'où l'on tirera la capacité x.

Cas des vapeurs. — Les vapeurs sont des gaz considérés prés de leur point de liquéfaction. La mesure de leur capacité calorifique exige que l'on connaisse la quantité de chaleur qu'elles abandonnent sous l'unité de masse pour passer de l'état gazeux à l'état liquide, sans changement de température.

Nous verrons plus loin (980) comment on trouve cette quantité, que nous supposerons connue.

Cela posé, voici comment on opère. La vapeur du liquide en ébullition passe dans le serpentin S (*fig.* 666) et s'y échauffe jusqu'à T°, température supérieure au point d'ébullition Θ du liquide. Cette vapeur surchauffée se rend dans le calorimètre, s'y liquéfie, et le liquide formé reste dans le vase V, où il prend la température du calorimètre ; son poids P est égal à celui de la vapeur employée. La quantité de chaleur reçue par le calorimètre est évaluée par le moyen indiqué pour le cas des gaz. Cette quantité de chaleur provient : 1° de la chaleur $Px(T-\Theta)$ abandonnée par la vapeur pendant que sa température descend de T° à $\Theta°$, x désignant la capacité cherchée ; 2° de la chaleur PL que la vapeur abandonne ensuite en se liquéfiant ; 3° de celle enfin qu'abandonne le liquide formé, pour se refroidir de $\Theta°$ à la température finale θ du calorimètre, quantité égale à $P(c\Theta - c_1\theta)$, en désignant par c et c_1, les capacités moyennes du liquide entre 0° et $\Theta°$, et entre $\Theta°$ et $\theta°$. On a donc

$$[x(T-\Theta)+L+c(\Theta-\theta)] = \frac{p}{P}(\theta-r-t)+c_1\theta,$$

t, r et p, ayant les mêmes significations que dans la formule [1]. On répète l'expérience en donnant au gaz, une température T' beaucoup plus élevée que T; θ, r, t, c_1, se changent en θ', r', t', c'_1, et en retranchant membre à membre la nouvelle équation obtenue au moyen de ces quantités, de l'équation précédente, il vient

$$x(T'-T) = p\,\frac{\theta'-r'-t'}{P'} - \frac{\theta-r-t}{P} + c'_1\theta' - c_1\theta,$$

formule qui servira à calculer la capacité moyenne x de la vapeur entre les températures T' et T.

Les résultats obtenus ainsi sur les vapeurs, comportent des incertitudes assez grandes, parce que L est un nombre considérable, comme nous le verrons; de sorte que les quantités que l'on retranche étant très grandes, tandis que la différence $x(T'-T)$ est très petite, les erreurs d'observation, qui peuvent s'ajouter dans la différence, peuvent former une partie notable de cette quantité.

909. Résultats. — Il résulte des expériences de M. Regnault, que la capacité en poids des gaz qui suivent la loi de Mariotte ne dépend ni de la *température* ni de la *pression*; ce qui montre que les indications du pyromètre à air sont proportionnelles aux quantités de chaleur qu'il reçoit. Il n'en est plus de même des gaz qui peuvent se liquéfier; par exemple, l'acide carbonique a donné en poids, les nombres 0,18427; 0,20246; 0,21692, entre −30° et 10°, 10° et 100°, 10° et 210°. Sa capacité peut être représentée par la formule $c = A\theta + B\theta^2 + c\theta^3$. D'après plus de 100 déterminations faites dans des conditions variées, la capacité de l'air est notablement supérieure à celle

qu'ont trouvée Delaroche et Bérard. Il est à remarquer aussi que la capacité, en poids, de la vapeur d'eau, n'est guère que la moitié de celle qui a été trouvée par les mêmes physiciens ; elle est sensiblement égale à celle de la glace, et moitié de celle de l'eau. Voici les nombres trouvés par M. Regnault :

	GAZ.	CHALEURS SPÉCIFIQUES en poids.	CHALEURS SPÉCIFIQUES en volume.
Gaz simples ou mélangés.	Air	»	0,2374
	Oxygène	0,2175	0,2405
	Azote	0,2438	0,2370
	Hydrogène	3,4090	0,2359
	Chlore	0,1210	0,2962
	Brome	0,0555	0,2990
Gaz composés.	Protoxyde d'azote	0,2238	0,3447
	Bioxyde d'azote	0,2315	0,2406
	Oxyde de carbone	0,2450	0,2370
	Acide carbonique	0,2163	0,3307
	Acide sulfureux	0,1544	0,3414
	Acide chlorhydrique	0,1845	0,2333
	Acide sulfhydrique	0,2431	0,2857
	Gaz ammoniac	0,5083	0,2996
	Hydrogène protocarboné	0,5929	0,3277
	Hydrogène bicarboné	0,4040	0,4106
Vapeurs.	Eau	0,4805	»
	Sulfure de carbone	0,1570	0,4140
	Alcool	0,4534	0,7171
	Ether	0,4810	1,2296
	Ether chlorhydrique	0,2737	0,6096
	Ether bromhydrique	0,1816	0,6777
	Ether sulfhydrique	0,4005	1,2568
	Ether cyanhydrique	0,4261	0,8290
	Chloroforme	0,1566	0,8310
	Liqueur des Hollandais	0,2293	0,7911
	Ether acétique	0,4008	1,2184
	Acétone	0,4125	0,8341
	Benzine	0,3754	1,0114
	Essence de térébenthine	0,5061	2,3776
	Protochlorure de phosphore	0,1346	0,6386
	Chlorure d'arsénic	0,1122	0,7013
	Chlorure de silicium	0,1329	0,7788
	Chlorure d'étain	0,0939	0,8639
	Chlorure de titane	0,1263	0,8634

Il résulte de la comparaison des nombres contenus dans ce tableau, que :

1° Les chaleurs spécifiques *en volume*, de l'*oxygène*, de l'*azote* et de l'*hydrogène*, diffèrent très peu les unes des autres ; ce qui confirme, pour ces gaz, la loi de l'égalité des capacités. Mais le chlore et le brome ont des capacités, sensiblement égales entre elles, très supérieures à celles des autres gaz simples. Cela tient-il à la proximité du point de liquéfaction, ou bien faut-il en

conclure que le chlore et le brome ne sont pas des corps simples, comme le cyanogène, qui présente tant d'analogies avec eux? C'est ce qui ne peut être décidé dans l'état actuel de la science.

2° La première des deux lois énoncées par Dulong (907) est sensiblement exacte pour les gaz qui suivent la loi de Mariotte. Appliquée à l'oxyde de carbone, elle montre que la densité de la vapeur de carbone est bien celle qu'ont adoptée les chimistes. Il est à remarquer aussi que la loi s'applique à l'acide chlorhydrique, dont un des éléments, le chlore, n'y satisfait pas quand il est isolé. — La seconde loi, relative aux gaz dans la formation desquels il y a condensation égale, ne se vérifie pas, comme on peut le voir sur l'acide carbonique, les vapeurs d'eau et de sulfure de carbone, composés formés de trois volumes condensés en deux.

3° Nous avons vu que la loi des capacités des atomes s'applique aux gaz simples qui suivent la loi de Mariotte (904); mais il est à remarquer que le produit du poids atomique par la capacité en poids, est à peu près moitié du produit correspondant pour les corps solides et liquides. Il en est de même du produit des capacités par les poids atomiques moyens, pour les gaz composés; le produit se trouve divisé par 2. Il y a donc là un phénomène imprévu qui attend encore son interprétation théorique.

4° La chaleur spécifique *en poids* d'un corps gazeux, est toujours plus faible que celle du même corps liquide; quelquefois moindre que la moitié, comme pour le brome.

910. De la capacité des gaz à volume constant. — Nous avons indiqué la différence que les physiciens ont établie entre les chaleurs spécifiques des gaz à pression constante et à volume constant (900). Les méthodes que nous avons décrites donnent la capacité sous *pression constante*. On avait cru pouvoir passer de cette capacité à la capacité à volume constant, en partant de cette supposition, que l'on regardait comme évidente, que cette dernière est moindre que la capacité à pression constante, de toute la chaleur nécessaire pour dilater le gaz quand sa pression reste invariable; et cette quantité de chaleur se déduisait de celle qui se dégage quand on comprime subitement le gaz pour le ramener à son premier volume. Clément et Désormes ont fait à ce sujet des expériences célèbres, que nous décrirons en traitant des moyens de produire de la chaleur (1046). Mais ces expériences, propres à faire connaître la chaleur dégagée par la compression des gaz, ne peuvent servir à trouver la différence entre les deux sortes de capacité. Il résulte, en effet, des nouvelles théories sur l'équivalent mécanique de la chaleur, que la dilatation d'un gaz ne peut être accompagnée d'une absorption sensible de chaleur quand elle se fait sans éprouver d'obstacle, et sans produire d'effet mécanique (v. p. 511). On doit conclure de là qu'il ne doit y avoir qu'une différence imperceptible entre la capacité d'un gaz renfermé dans un vase qui ne lui permet pas de se dilater, et sa capacité quand il se dilate librement sans rencontrer de résistance. Nous reviendrons sur ce sujet dans le chapitre suivant, en parlant de la transformation du travail mécanique en chaleur et *vice-versâ* (1077).

CHAPITRE VI.

CHANGEMENTS D'ÉTAT DES CORPS. — VAPEURS.

> « ..... Comme l'eau a la propriété, étant par le feu changée en vapeur, de faire ressort comme l'air, et ensuite de se recondenser si bien par le froid qu'il ne lui reste plus aucune apparence de cette force de ressort, j'ai cru qu'il ne serait pas difficile de faire des machines dans lesquelles, par le moyen d'une chaleur médiocre et à peu de frais, l'eau ferait ce vide parfait, qu'on a inutilement cherché par le moyen de la poudre à canon..... »
>
> (Papin, *Recueil de diverses pièces*, etc. (1695), p. 53.)

§ 1. — FUSION ET SOLIDIFICATION.

I. Fusion des corps solides.

911. Nous avons vu que le premier effet de la chaleur sur les corps est de les dilater en élevant leur température; et, dans le chapitre qui précède, nous avons appris à mesurer les quantités de chaleur nécessaires pour produire ces divers effets.

La chaleur peut aussi changer l'état des corps. Quand on échauffe suffisamment un corps solide, il fond, c'est-à-dire qu'il passe à l'état *liquide*. Ce liquide se dilate si l'on continue à élever sa température, puis il se transforme à son tour, et passe à l'état de *vapeur* ou de *gaz*. Si l'on vient au contraire à refroidir un gaz, c'est-à-dire à lui enlever une partie de la chaleur qu'il contient, il se condense à l'état liquide, puis se solidifie, si le refroidissement est suffisant. Ces passages successifs d'un état à un autre exigent pour s'accomplir des quantités déterminées de chaleur, que l'on est parvenu à mesurer; ils sont soumis à des lois particulières, et accompagnés de phénomènes remarquables que nous allons étudier.

912. Lois de la fusion. — Le passage d'un corps solide à l'état liquide peut se faire par deux causes différentes : par la chaleur ou par l'action d'un liquide qui le dissout et lui sert de véhicule. Les chimistes du XVIIIe siècle,

qui considéraient la chaleur comme une matière qu'ils nommaient *calorique*, réunissaient les deux causes en une seule, en regardant la fusion par la chaleur comme une *dissolution* dans le calorique. Nous nous occuperons, d'abord, de la liquéfaction produite par la chaleur.

La fusion par la chaleur est soumise aux lois suivantes :

1° *Chaque substance fond à une température déterminée, qu'on appelle son point de fusion.*

2° *Quand la fusion est commencée, la température du corps solide n'augmente plus ; elle ne peut dépasser le point de fusion.*

3° *Pour la plupart des substances, il y a un changement brusque de volume au moment du passage à l'état liquide.*

Nous allons nous arrêter successivement sur les deux premières lois ; nous nous occuperons de la troisième en parlant du passage de l'état liquide à l'état solide, dans lequel le même changement de volume se produit, mais en sens inverse.

213. Du point de fusion. — L'existence d'une température de fusion, déterminée pour chaque substance, se présente si naturellement à l'esprit, qu'on a peine à concevoir comment la première loi a pu être si longtemps méconnue. Du reste, la température de fusion des divers corps est très différente : par exemple, le mercure solide fond à — 40°, la glace à 0°, le plomb à 322°, le fer au rouge blanc,

Substances réfractaires. — On nommait autrefois substances *fixes* ou *réfractaires*, celles qui n'avaient pu être fondues. Ces termes s'appliquent aujourd'hui, dans un sens plus restreint, aux corps qui ne fondent que difficilement, comme le platine. La grande différence qui existe entre les points de fusion des corps fusibles avait conduit à admettre que tous seraient susceptibles de se présenter à l'état liquide, si l'on pouvait porter leur température à un point assez élevé. L'expérience a confirmé cette prévision, et l'on a vu diminuer chaque jour le nombre des substances infusibles.

On obtient la fusion des substances réfractaires, au moyen de l'*électricité*, ou du *chalumeau à hydrogène et oxygène*. C'est ce qu'on fait pour le platine. Cependant M. Sainte-Claire Deville est parvenu à le fondre au feu de forge, dans un creuset en chaux, en faisant arriver l'air du soufflet par une couronne de petits trous qui le répandaient dans toute la masse du combustible, et en employant un coke très dur en petits fragments, provenant des résidus de la combustion imparfaite de la houille. Il a pu, par le même moyen, fondre la silice, qui n'avait pu l'être que par le chalumeau à hydrogène et oxygène. La baryte, la chaux, la magnésie ont été fondues par Lavoisier, au moyen du chalumeau à hydrogène et oxygène. M. Gaudin a fondu le quartz, l'alumine, par le même moyen. Les miroirs et les verres ardents sont aussi employés pour fondre les substances réfractaires. M. Despretz est parvenu à fondre le *bore* et le *silicium*, au moyen d'une pile de 600 éléments, et en employant des moyens particuliers que nous indiquerons plus tard. Le charbon lui-même s'est ramolli entre les

mains du même physicien, et a donné des indices non équivoques de fusion.

Voici le tableau des points de fusion de différents corps :

SUBSTANCES.	DEGRÉS centigrades.	SUBSTANCES.	DEGRÉS centigrades.	PYROMÈTRE de Wedgwood.
Mercure	— 39°	Etain	235°	
Brome	—20	Bismuth	260	
Essence de térébent.	—10	Plomb	325	
Glace	0	Zinc	362	
Beurre	32	Antimoine	433	
Suif	33	Bronze	900	
Spermaceti	49	Argent pur	1000	20
Stéarine	55	Cuivre	»	27
Acide margarique	60	Fonte blanche	1050	»
Cire vierge	61	Fonte grise	1100	»
Cire blanche	68	Or ($\frac{1}{10}$ cuivre)	1180	»
Acide stéarique	70	Or pur	1250	32
Phosphore	44	Cobalt	»	130
Potassium	58	Acier	1400	130
Sodium	90	Fer doux	1500	130
Iode	107	Fer écroui	1600	»
Soufre	111	Nickel	»	160
Camphre	175	Manganèse	»	160

Presque toutes les températures supérieures à 500° ont été déterminées par M. Pouillet, soit au moyen du pyromètre à air (873), soit au moyen des chaleurs spécifiques du platine, déterminées d'avance par la méthode des mélanges (892).

Procédé de Hall. — Il y a des substances qui se décomposent par l'action de la chaleur, avant d'entrer en fusion. Hall, pour confirmer la théorie géologique de Hutton, a fait des expériences dans lesquelles il a pu fondre la craie, la houille, la corne[1]. Il renfermait ces substances dans des tubes de porcelaine ou de fer hermétiquement fermés, de manière que les gaz provenant d'une petite portion décomposée exerçaient une pression énorme, qui empêchait le reste de se décomposer. La craie entre ainsi en fusion, et prend souvent, après le refroidissement, l'aspect du marbre saccharoïde ; on distingue dans la cassure, une multitude de facettes cristallines. La sciure de bois se transforme, dans les mêmes circonstances, en un charbon bitumineux semblable à la houille, et brûlant avec une flamme brillante.

Fusion vitrée. — La plupart des corps passent brusquement à l'état liquide, comme la glace, le soufre, les métaux ; d'autres, au contraire, se

[1] *Bibliothèque britannique,* 1804, t. XXVII, p. 289

ramollissent par degré, de sorte que le passage d'un état à l'autre se fait graduellement, et que le point de fusion ne peut être fixé. Seulement, à chaque degré de mollesse correspond une même température, autant qu'on en peut juger, l'appréciation du degré de consistance étant très incertaine. Le verre, l'acide phosphorique, les silex, les résines, la poix..., sont dans ce cas. Ce mode de fusion se nomme *fusion vitrée*, le verre le présentant à un haut degré; c'est même sur cette propriété que sont fondés les divers procédés que l'on emploie pour souffler et travailler cette substance.

914. Chaleur latente de liquidité. — Pendant qu'un corps fond, on remarque que sa température reste constante, quelle que soit l'intensité de la chaleur fournie. Ce phénoméne remarquable a d'abord été observé sur la glace fondante, par les académiciens de Florence, et constaté depuis, sur une foule d'autres substances. Black en a conclu que toute la chaleur cédée au corps, disparaît et est employée pour produire l'état liquide. Si l'on fournit une plus grande quantité de chaleur, on fait fondre dans le même temps une plus grande quantité de la substance. Un corps à l'état liquide paraît donc posséder une quantité considérable de chaleur, insensible à nos organes, et qui ne produit pas d'effets sur le thermomètre. Cette chaleur a reçu le nom de *chaleur latente*, par opposition au nom de *chaleur sensible* donné à la chaleur qui produit les changements de température. La découverte de la chaleur latente de liquidité est une des plus remarquables qui ait été faite au XVIIIe siècle; elle a concouru avec celle de la chaleur spécifique à rendre célèbre l'école d'Edimbourg.

On doit se demander si la chaleur qui disparaît existe bien réellement dans le liquide à l'*état latent*, ou si, plutôt, elle n'est pas *détruite* pendant le changement d'état. C'est ce que nous examinerons en nous occupant de l'*équivalent mécanique* de la chaleur (1077). Quoi qu'il en soit, l'hypothèse de la chaleur latente, considérée comme l'expression des phénomènes, peut être conservée sans inconvénient. C'est ce que nous ferons, sauf à revenir plus tard sur ce sujet.

II. Solidification des liquides.

915. Phénomènes relatifs à la température. — Quand on enlève de la chaleur à un liquide, il passe à l'état solide. La *solidification* porte le nom de *congélation* quand elle se fait à une basse température. On remarque dans ce phénomène les lois suivantes :

1° *Le point de solidification est fixe pour chaque substance, et le même que le point de fusion.* A la température du point de fusion, la moindre soustraction de chaleur fait solidifier une partie du corps s'il est à l'état liquide, et la moindre addition de chaleur en fait fondre une partie s'il est à l'état solide. Ce résultat, établi par Newton, a longtemps été contesté. Les points de solidification des divers liquides sont donc très différents ; et il en est qui passent

graduellement d'un état à l'autre, en prenant successivement des consistances de plus en plus prononcées. Les substances qui présentent cette particularité sont celles qui la présentent aussi pendant la fusion (913).

2° *Pendant tout le temps de la solidification, la température du liquide ne peut s'abaisser*, quelle que soit la quantité de chaleur soustraite à chaque instant. Ainsi, un thermomètre plongé dans de l'eau exposée à une température très basse, reste à *zéro* pendant la congélation. Celle-ci se fait graduellement, et d'autant plus rapidement que le froid est plus intense. Ce résultat s'explique par la transformation de la *chaleur latente de liquidité*, en chaleur sensible. Cette chaleur rétablit continuellement la température; sans cela la congélation, au lieu de se faire graduellement, se ferait subitement et en même temps dans toute la masse, dès que le point de congélation serait atteint.

Il y a des liquides qui n'ont pu être congelés, comme le sulfure de carbone, l'alcool absolu et plusieurs autres liquides d'origine organique. Cependant l'alcool a pu être amené par M. Despretz, à un degré de consistance telle que le vase qui le contenait pouvait être renversé sans qu'il s'écoulât. Le froid était produit par un mélange de protoxyde d'azote liquéfié, d'acide carbonique solide et d'éther. La grande différence entre les points de solidification des divers liquides autorise à penser que tous les liquides se congèleraient si l'on pouvait les refroidir suffisamment.

Le mercure a été congelé pour la première fois par Braun, en 1759, au moyen d'un mélange réfrigérant formé de neige et d'acide nitrique. Ce métal présente alors le même aspect que le plomb; on peut le battre à coups de marteau. En le touchant, on éprouve une impression de froid que l'on confond avec celle que produirait un fer chaud. On a vu, depuis, le mercure se congeler par le froid naturel, dans les régions boréales.

916. Surfusion. — La température d'un liquide peut être abaissée au-dessous du point de solidification, sans qu'il change d'état. Ainsi, la température de l'eau peut être abaissée à —12° sans qu'elle cesse d'être liquide. L'étain fondu, qui se solidifie à 228°, peut rester liquide à 225°. Le salpêtre en fusion, versé dans un vase en porcelaine, reste souvent liquide au-dessous du point de solidification, puis il se solidifie tout à coup, et sa température remontant au point de fusion, le vase peut être brisé par cet échauffement brusque. Le phosphore, qui fond à 44°, peut rester liquide à 22°. M. Schroetter a pu même le porter à —5° sans qu'il cesse d'être liquide. Le soufre fondu sur la boule d'un thermomètre, s'y maintient liquide à la température de 10 à 15°, en gouttelettes qui se solidifient brusquement par le contact d'un corps solide.

Eau au-dessous de 0°. — Le phénomène qui nous occupe, connu sous le nom de *surfusion*, a été d'abord observé sur l'eau, et c'est aussi sur ce liquide qu'il a été le plus particulièrement étudié. Fareinheit vit l'eau rester liquide dans un matras fermé à col effilé, exposé à l'air au-dessous de 0°. Ayant brisé l'extrémité du tube, il vit la congélation se faire aussitôt, ce qu'il attribua au contact de l'air. Mais une autre fois, ayant fait un faux pas, en portant un

vase dans lequel se trouvait de l'eau au-dessous de 0°, il vit une partie du liquide se congeler subitement, et en même temps la température remonter à 0°, à cause de la chaleur latente abandonnée par la partie solidifiée. Cette élévation de température prouve, encore mieux que la constance de la température pendant sa solidification, le passage à l'état sensible de la *chaleur latente* de liquidité.

On peut porter l'eau jusqu'à — 12°, tout en lui conservant l'état liquide. Pour que l'expérience réussisse, il faut que les différentes parties du liquide soient en repos les unes par rapport aux autres, qu'il ne se produise pas de courants intérieurs ; ce qu'on obtient en refroidissant le vase par le bas, et en opérant lentement. L'eau doit être limpide ; sans cela, les mouvements des parcelles en suspension, qui se contractent autrement que le liquide, en troubleraient la tranquillité.

L'eau purgée d'air n'est pas aussi propre à ces sortes d'expériences ; elle se congèle plus facilement que l'eau aérée, ce que Black attribue aux mouvements provoqués à la surface, par l'air qui se dissout. Aussi réussit-on mieux en recouvrant la surface d'une couche d'huile, comme de Mairan le fait remarquer dans sa dissertation sur la glace.

Blagden, qui a fait un long travail sur le phénomène qui nous occupe, a constaté que l'eau continue à se dilater au-dessous de zéro, tandis que la glace se contracte, comme tous les corps solides. On peut donc dire que l'eau se dilate indéfiniment, tant qu'elle reste liquide, au-dessus et au-dessous de 4 degrés. M. Despretz a suivi sa dilatation jusqu'à — 20°.

Quand l'eau a été amenée au-dessous de zéro, il suffit, pour la faire congeler en partie, d'y projeter une parcelle de glace, autour de laquelle s'accumule aussitôt un amas de glace ; ou bien d'imprimer au vase, un mouvement vibratoire, ou un choc, par lequel les molécules soient déplacées les unes par rapport aux autres. On voit alors des aiguilles de glace s'entrecroiser en tous sens, et la température remonter subitement à zéro, par le dégagement de la chaleur latente qui devient sensible ; ce qui limite la quantité de glace formée.

Appelons c la chaleur spécifique de la glace, l le nombre de calories dégagées par la congélation d'un gramme d'eau, P le poids de l'eau, et $-t^\circ$ sa température ; le poids p de glace formée sera donné par l'équation

$$pl = pct + (P - p)\,t + \pi Ct,$$

qui exprime que la quantité de chaleur pl dégagée par la glace formée, est égale à la quantité de chaleur $Pct + (P - p)\,t$ absorbée par la glace et par l'eau qui reste, pour s'élever de $-t^\circ$ à 0°, augmentée de la chaleur πCt absorbée par le vase. Nous verrons que l est égal à 79 calories. Toute la masse sera solidifiée si l'on a $p = P$, ce qui donne $t = 79p : cp$, en négligeant la chaleur enlevée par le vase ; d'où l'on tire $t = 39°,5$, la chaleur spécifique de la glace étant à peu près 0,5. C'est donc à — 39°,5 qu'il faudrait porter l'eau pour que toute

la masse se congelât subitement; mais on n'a pu jusqu'à présent maintenir l'eau à l'état liquide, à une aussi basse température.

Le phénomène de la *surfusion* s'explique par l'inertie des molécules. Ces molécules sont les unes par rapport aux autres dans un état d'équilibre instable rendu permanent par la viscosité du liquide, qui les empêche de se déplacer les unes par rapport aux autres pour prendre les positions qui correspondent à l'état solide. Le contact d'une parcelle de glace rompt l'équilibre, à cause de l'action exercée par les molécules déjà fixées, sur celles qui les touchent. Des vibrations, qui les déplacent les unes par rapport aux autres, leur permettent de céder aux forces qui tendent à les grouper régulièrement, tandis qu'un mouvement imprimé à une grande partie de la masse, les déplaçant toutes en même temps, ne produit pas toujours le même effet. Une agitation trop vive peut aussi empêcher la congélation, quoique la température soit inférieure à 0°, des mouvements trop rapides empêchant les molécules de céder aux influences qu'elles exercent les unes sur les autres. Ce fait a été constaté par M. Despretz sur l'eau pure et sur les dissolutions de divers sels dans l'eau. Avec une dissolution de potasse renfermant 0,617 de cette substance, la température peut être maintenue, pendant l'agitation, à plus de 2° au-dessous du point de congélation[1]. Cette circonstance a conduit M. Despretz à définir ce point : *la température stationnaire et constante qui se produit quand le passage à l'état solide est commencé ;* alors la température est la même que celle du point de fusion.

On peut encore maintenir l'eau au-dessous de 0°, en la renfermant dans des tubes très capillaires; l'action des parois du tube gêne les mouvements des molécules, au point d'empêcher leurs déplacements relatifs. M. Despretz a pu maintenir ainsi de l'eau à —20°, dans des tubes thermométriques ordinaires. Ce phénomène explique comment les corps organisés résistent à la gelée, les fluides étant chez eux renfermés dans des vaisseaux microscopiques. Comme rien n'est plus facile à confondre qu'un filet très mince d'eau et un filet de glace, M. Sorby a eu recours, pour les distinguer, à des phénomènes de coloration que la glace produit quand elle est traversée par de la *lumière polarisée*, et qu'on l'observe avec un microscope armé d'un *polariscope*; phénomènes que nous expliquerons dans l'optique.

Les liquides, et particulièrement l'eau, en gouttelettes fines, peuvent rester liquides au-dessous de zéro, à cause de l'action exercée sur les molécules intérieures par celles de la superficie, qui sont dans un état d'équilibre particulier (I, 219). C'est ce qui a lieu d'après M. Mousson, pour des gouttes d'eau de moins de $\frac{1}{2}$ millimètre de diamètre, disposées sur une surface qu'elles ne mouillent pas ; le contact d'une pointe d'aiguille les fait aussitôt congeler. De fines gouttelettes de phosphore, de soufre, et même d'argent fondu, présentent ainsi une inertie moléculaire remarquable. Il résulte de là que les gouttelettes

[1] *Comptes-rendus des séances de l'Académie des sciences* de Paris, t. V, p. 19.

d'eau très fines qui composent les nuages et les brouillards, peuvent être à une température bien inférieure à 0°. Ce fait avait déjà été constaté par Saussure, en 1783; mais il a été établi, surtout par M. Fournet, au moyen de nombreuses observations, poursuivies pendant l'hiver, de 1841 à 1855. Souvent le thermomètre était à 10°, 12°, et même 15° au-dessous de zéro, et l'air était obscurci par un épais brouillard [1].

917. Changement du point de fusion avec la pression. — Des considérations théoriques relatives à la transformation de la chaleur en travail mécanique, sur lesquelles nous reviendrons dans le chapitre suivant, avaient fait penser à M. J. Thomson qu'il devait y avoir, sous l'influence de la compression, un léger abaissement du point de fusion de la glace, qui augmente de volume en se solidifiant; tandis que les substances qui se contractent au moment de la solidification devaient fondre à une température un peu plus élevée, sous une forte pression. M. W. Thomson a voulu vérifier ce résultat par l'expérience [2]. Comme la théorie n'indiquait qu'une fraction de degré pour des pressions d'une dizaine d'atmosphères, il a remplacé le mercure du thermomètre par l'éther, qui se dilate 9 fois plus. L'instrument, renfermé dans un tube épais contenant du mercure qui enveloppait son réservoir *t* (*fig.* 668), était introduit dans l'appareil d'Œrsted pour la compressibilité des liquides. Au fond était de la glace pure. Une rondelle de plomb *r* supportait d'autre glace, et l'espace restant était rempli d'eau distillée. Le thermomètre étant à 0°, on comprima l'eau, en enfonçant le piston au moyen de la vis *v*, et l'on vit le thermomètre baisser; ce qui ne pouvait être dû qu'à un refroidissement, cet instrument étant soustrait à la compression. La température de l'eau en contact avec la glace se trouvait donc au-dessous de zéro, ce qui montre que le point de congélation était abaissé. Deux expériences faites avec soin ont donné 0°,059 et 0°,129 sous les pressions de 8,1 et de 16,8 atmosphères, pressions données par le manomètre *n*.



Fig. 668.

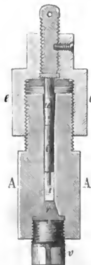


Fig. 669.

M. Mousson, au moyen de compressions énormes, est parvenu à abaisser le

[1] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. XLVI, p. 203.

[2] *Phil. magaz.*, 3e série, p. 123; et *Ann. de ch. et de ph.*, 3e s., t. XXXV, p. 381, 383.

point de congélation de l'eau jusqu'à — 18° [1]. L'eau est contenue dans un prisme en acier AA (*fig.* 669), percé dans toute sa longueur, et dont la partie inférieure est fermée par un cône en cuivre *c*, pressé par une forte vis *v*. La partie supérieure, légèrement conique, est fermée par un long cône en cuivre *f* sur lequel s'appuie un cylindre en acier *a* que l'on presse fortement au moyen de l'écrou *ee*. L'appareil étant renversé et le cône *c* enlevé, il fut rempli d'eau bouillie ; on y introduisit un morceau de fil de cuivre *i* destiné à servir d'index, et l'on fit congeler l'eau. On plaça alors le bouchon *cv*, et l'appareil étant redressé dans la position de la figure, on le plongea dans un mélange réfrigérant à la température de — 18 à — 20°, et l'on exerça une très forte compression en faisant tourner l'écrou *ee* au moyen d'un levier de 60^{cm} de longueur. La vis ayant ensuite été retirée, le cône *c* fut repoussé, la glace l'enveloppa instantanément, et l'index *i* fut trouvé immédiatement derrière lui. Cet index avait donc pu traverser la colonne, d'une extrémité à l'autre, d'où l'on doit conclure que la glace avait passé à l'état liquide pendant l'expérience, et qu'elle ne s'était congelée qu'au moment où l'on avait diminué la pression en desserrant la vis *v*.

M. Mousson évalue la pression exercée, dans cette expérience, à 130 kil. environ par millimètre carré, ou à plus de 13000 atmosphères. La diminution correspondante de volume aurait été d'environ $\frac{1}{13}$.

Le cas des substances qui se contractent en se solidifiant a été examiné par M. Bunsen [2] sur le *blanc de baleine* et la *paraffine*. Un tube capillaire à parois épaisses (*fig.* 670), recourbé en *cde*, présente un renflement *bc*. On le remplit de mercure, et l'on ferme à la lampe l'extrémité *a*, en y laissant une petite colonne d'air destinée à mesurer la pression. On fait sortir un peu de mercure en *e*, on le remplace par du blanc de baleine ou de la paraffine, et l'on ferme l'extrémité *e*. La partie *cde* étant plongée seule dans de l'eau à 50°, la substance fond, puis, l'eau se refroidissant, elle se solidifie à une température indiquée par un thermomètre placé à côté de l'instrument. On répète l'expérience en plongeant dans l'eau chaude une partie plus ou moins grande du renflement *bc*, de manière que le mercure, en se dilatant, comprime le blanc de baleine. On trouve alors que la solidification se fait à une température un peu plus élevée. Voici les résultats obtenus :



Fig. 670

Blanc de baleine...	Pressions.....	1 atm.	29	96	141	156
	Températures .	47°,7	48,3	49,7	50,5	50,9
Paraffine........	Pressions.....	1 atm.		85	100	
	Températures .	46°,3		48,9	49,9	

[1] *Bibl. de Gen.* (arch. des sc.), t. III, 1858 ; et *Ann. de ch. et ph.*, 3e s., t. LVI, p. 252.
[2] *Annales de Pogg.*, t. LXXXI, p. 562, et *Ann. de ch. et ph.*, 3e s., t. XXXV, p. 383.

L'abaissement du point de congélation de l'eau par la pression a servi à expliquer l'espèce de ductilité que présente la glace des glaciers, qui glissent dans les vallées, s'allongent, en en suivant les sinuosités et en se moulant sur le fond, et présentent cette particularité que les couches inférieures, pressées par les couches supérieures, descendent plus vite que ces dernières, comme s'il s'agissait d'une masse pâteuse. Or, M. Tyndall a prouvé, par des expériences directes, que la glace peut devenir plastique sous l'influence d'une forte pression [1]. Il prit une boule de glace à zéro, de quelques centimètres de diamètre, et la comprima, au moyen d'une presse hydraulique, entre deux blocs de bois dur laissant entre eux une cavité lenticulaire. La glace se brisa d'abord en une multitude de fragments, qui bientôt se soudèrent de manière à former, en quelques secondes, une lentille de glace transparente. En donnant aux cavités, des formes différentes, M. Tyndall a pu mouler la glace sous des formes plus compliquées : par exemple, il a pu obtenir une coupe en glace bien transparente au moyen des blocs de bois A et B (*fig.* 671), dont il a pu ensuite la séparer en poussant la cheville B.

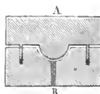


Fig. 671.

Voici comment M. J. Thomson explique ces phénomènes. La glace comprimée se liquéfie en partie, parce que la compression abaisse le point de congélation; et elle se refroidit à cause de l'absorption d'une certaine quantité de chaleur latente. L'eau de fusion est chassée dans les pores et les fissures de la glace ; là elle cesse d'être comprimée, ce qui fait remonter le point de congélation ; elle se solidifie donc en soudant les petits fragments.

918. Regel. — MM. Tyndall et Forbes, n'admettant pas cette explication, ont cherché à rattacher le moulage de la glace à un autre phénomène découvert par M. Faraday, vers 1850, et désigné sous le nom de *regel*. Voici en quoi il consiste : si l'on met en contact deux morceaux de glace *fondante*, l'eau qui les mouille ne tarde pas à se congeler, de manière qu'ils se soudent solidement l'un à l'autre. On a voulu voir dans ce phénomène un effet de la pression produite par la capillarité. Mais le résultat a encore lieu quand les morceaux de glace sont plongés dans l'eau, froide ou chaude. M. Forbes a vu aussi des pièces de monnaie, des étoffes se souder à la glace fondante. Il nous semble que ces faits peuvent se rattacher aux phénomènes suivants observés par M. Person : si l'on plonge une masse de glace dans de l'eau maintenue à la température de 0°, dans un vase entouré de glace fondante, cette masse s'accroît continuellement. Ce phénomène montre l'existence d'actions moléculaires exercées par la glace formée, sur les molécules d'eau à 0°. La chaleur dégagée par la congélation de celle-ci est sans cesse absorbée par le vase maintenu à 0°. Or, dans le cas de l'expérience du regel, tant que la surface de la glace est exposée à

[1] *Trans. phil.* (1857), 2e p.; et *Bibl. de Gen.* (arch. des sc., 1858). t. II, p. 200.

l'action du milieu ambiant, elle en reçoit de la chaleur, et fond; quand ensuite elle est appliquée contre une autre surface, les actions des molécules de glace sur les molécules de la mince couche d'eau interposée, détermine la solidification de celle-ci, par une action analogue à celle qui fait que l'eau au-dessous de zéro se congèle subitement au contact d'une parcelle de glace. La chaleur latente abandonnée traverse la glace et produit une augmentation dans la fusion des parties extérieures. Il n'y aurait donc là qu'un déplacement de chaleur, occasionné par des actions moléculaires.

919. Changement de volume. — Au moment de la solidification, il y a généralement un notable changement de volume. Ce changement est ordinairement une contraction, comme pour le mercure, mais il y a quelques substances qui éprouvent une augmentation de volume en se solidifiant. L'eau est dans ce cas. Réaumur a découvert la même particularité dans la *fonte de fer*, le *bismuth* et l'*antimoine*. Si l'on coule du bismuth dans des tubes de verre chauds, ils sont brisés au moment de la solidification. La fonte doit à cette propriété la grande perfection avec laquelle elle reproduit les plus fins détails des moules dans lesquels on la coule. A ces métaux il faut joindre l'acide sulfurique combiné avec 3 atomes d'eau, qui se congèle vers 6°; et, d'après M. Ermann, l'alliage formé de 1 partie de plomb, 1 d'étain et 4 de bismuth. On connaît donc en tout 6 substances qui sont plus denses à l'état liquide qu'à l'état solide.

L'augmentation de volume de l'eau qui se congèle est prouvée par ce fait que la glace flotte sur l'eau, ce qui démontre qu'elle est moins dense que ce liquide. Galilée a reconnu directement l'expansion de la glace; les académiciens de Florence l'ont également constatée en étudiant le maximum de densité; ils virent le niveau monter subitement dans leur tube thermométrique, au moment de la congélation. Néanmoins, cet accroissement de volume a été regardé depuis, comme apparent. Huyghens, Homberg, Mariotte... l'attribuaient à l'air qui se sépare de l'eau refroidie; mais l'eau purgée d'air et congelée dans le vide éprouve la même expansion. De Mairan l'expliquait par un désordre dans l'entrecroisement des petites aiguilles de glace, d'où résulterait un volume apparent plus grand que le volume réel. Mais ces explications tombent devant les expériences suivantes, qui prouvent que l'expansion se produit malgré les obstacles les plus résistants.

Force expansive de la glace. — Les académiciens de Florence firent congeler de l'eau dans une sphère de cuivre, qui s'étendit au point de ne pouvoir plus passer par un anneau qu'elle traversait facilement avant la congélation. Dans une autre expérience, la sphère se fendit, quoique très épaisse. Musschenbroeck a évalué à plus de 1200 kil. l'effort exercé.

Huyghens fit la même expérience avec un tube de fer; c'est de cette manière qu'on l'exécute aujourd'hui dans les cours : on remplit d'eau un tube de fer, par exemple un canon de pistolet dont on a bouché la lumière, et après avoir fermé l'ouverture avec un bouchon à vis, on le plonge dans un mélange réfrigérant. Au bout de quelque temps, on entend un craquement, et l'on reconnaît

que le tube a été fendu dans une certaine étendue. La glace retirée du tube est opaque et flotte sur l'eau bouillante. La grande résistance du fer n'a donc pu empêcher l'expansion de se produire.

Le major d'artillerie Eward William, étant à Québec, remplit d'eau une bombe de 13 pouces de diamètre, ferma le trou de la fusée avec un bouchon en fer enfoncé fortement, et l'exposa à la gelée. Au bout de quelque temps, le bouchon de fer fut lancé à plus de 400 pieds, et un cylindre de glace de 8 pouces de long sortit de l'ouverture. Dans d'autres expériences, le bouchon ayant résisté, la bombe fut brisée, et l'on vit une lame de glace s'échapper tout autour par la fente (*fig.* 672).

La force expansive de la glace peut servir à expliquer un grand nombre de phénomènes : les vases, les tuyaux remplis d'eau, se brisent par la gelée,

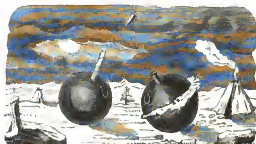


Fig. 672.

Quand un vase n'est pas entièrement rempli, la glace forme une proéminence *n* à la surface (*fig.* 673). Quand l'eau gèle dans toute son épaisseur, il se forme aussi des proéminences *a*, *c* au-dessus des points où il y a plus de profondeur, l'augmentation d'épaisseur étant proportionnelle à la hauteur du liquide. Dans les pays froids, quand la terre est très humide, le sol se gonfle en gelant, au point de soulever les maisons. Les pierres gélives tombent en poussière après la gelée : ce sont des pierres très poreuses qui, imprégnées d'eau, se divisent en tous sens par l'expansion de cette eau, quand elle se congèle. Les arbres éclatent par les grands froids, avec des détonations comparables à celles des armes à feu, à cause de l'expansion de la glace que forme la sève. La destruction des plantes, quand elles gélent, est attribuée à la désorganisation produite dans les tissus par une cause semblable. Cependant M. Dunnal a vu des plantes aquatiques geler et se dégeler plusieurs fois sans périr; et le microscope ne lui a montré aucun indice de désorganisation dans les tissus d'une plante morte par le froid.

On a cherché à expliquer l'expansion, pendant la solidification de certains corps, au moyen du nouvel arrangement que prennent les molécules en se

groupant d'une manière régulière, comme l'indique la cristallisation. Les substances qui éprouvent la fusion vitrée ne sont pas dans ce cas, et se contractent en se solidifiant. Pour l'eau, l'augmentation de volume est annoncée d'avance par la dilatation qu'elle éprouve au-dessous du maximum de densité. Il serait important de vérifier si les autres substances qui se solidifient avec expansion, possèdent aussi un maximum de densité. Nous avons déjà vu (855) que M. Despretz a constaté l'absence de ce phénomène sur diverses substances qui se contractent en se solidifiant.

Il résulte de ces considérations que, si l'on pouvait empêcher, par une pression assez forte, l'expansion de se produire, on empêcherait les molécules de prendre les positions qui correspondent à l'état solide, et la congélation ne pourrait se produire. C'est, en effet, ce qui a été constaté par M. Mousson [1],



Fig. 673.

qui a vu l'eau rester liquide à — 5° dans un tube de fer où elle était fortement comprimée par le même moyen que dans l'appareil *fig.* 969. Deux fentes opposées garnies de lames épaisses en verre permettaient de constater l'état liquide, en retournant l'appareil dans lequel on voyait alors se mouvoir l'index de cuivre; ce résultat est du reste d'accord avec le phénomène de la liquéfaction de la glace par la compression (917).

920. Évaluation de la variation de volume pendant le changement d'état. — Les expériences les plus nombreuses ont été faites sur la glace; et la plupart des expérimentateurs ont procédé en prenant sa densité à 0°. M. Brunner fils a trouvé en cherchant la perte de poids dans l'huile de pétrole, comme nous l'avons expliqué plus haut (838), le nombre 0,918, qui donne, pour l'augmentation de volume par la congélation, 0,07.

M. Dufour, considérant les différences notables qui existent entre les résultats obtenus par divers physiciens, a fait des expériences nombreuses sur la densité de la glace, en cherchant à former un mélange alcoolique dans lequel elle reste en suspension, ce qui évite de la peser [2]. Il prend ensuite la densité du mélange en cherchant la perte de poids qu'y éprouve une masse de verre. Le mélange était porté à —8 ou —10° pour éviter la dissolution de la glace, qui aurait été alors entourée d'une couche liquide plus dense que le mélange.

[1] *Bibliothèque universelle de Genève* (archives des sciences, 1858), t. III, p. 296.

[2] *Bibliothèque universelle de Genève* (archives des sciences, 1860), t. VIII, p. 320.

Pour avoir de la glace pure on faisait bouillir de l'eau dans un creuset de platine, puis on la faisait congeler dans un mélange réfrigérant, et l'on choisissait les parties extérieures de la masse de glace, qui étaient tout à fait exemptes de bulles d'air. La moyenne de 24 expériences a donné à M. Dufour pour densité de la glace à 0° par rapport à l'eau aussi à 0°, le nombre 0,9175, qui diffère peu de celui de M. Brunner, et qui donne pour l'expansion au moment de la congélation, $\frac{1}{11}$ du volume à 0°.

Corps divers. — M. Hermann Kopp a étudié les changements de volume au moment de la solidification, par la méthode suivante. La substance solide remplissait un tube de verre *a* (*fig.* 674), introduit dans un autre plus large. A ce dernier était ajusté un tube gradué *t*, par l'intermédiaire d'un bouchon en liége rendu imperméable par son immersion dans de l'huile à 100°. Un liquide, dont la nature variait suivant la substance placée en *a*, achevait de remplir l'appareil, et s'élevait jusqu'au zéro de la division du tube *t*. Le poids de ce liquide s'observait en retranchant de celui de l'appareil plein, le poids de l'appareil vide et celui du solide *a*. Ce liquide était l'huile d'olive dans le cas des sels, l'essence de térébenthine pour la glace, l'eau pour les autres substances sauf le soufre, pour lequel on a employé l'acide sulfurique. Dans ce cas, il n'y avait plus de bouchon, et le soufre était introduit dans un simple tube de thermomètre. Pour faire l'expérience, on échauffait l'appareil dans un bain d'huile, et l'on observait, pour chaque température, la position du niveau dans le tube *t*. Connaissant les dilatations du verre et du liquide, on calculait les volumes de la substance *a*, à l'état solide ou liquide.



Fig. 674.

Voici les principaux résultats obtenus : le *phosphore* se dilate uniformément de 0° à 44° ; alors il fond et se dilate brusquement dans le rapport de 1 à 1,0343, puis il se dilate régulièrement. Les coefficients sont 0,000383 à l'état solide, et 0,000506 à l'état liquide.

Le soufre se dilate irrégulièrement à l'état solide. M. H. Kopp a représenté son volume par une formule empirique dont les coefficients sont différents entre 0° et 78° et entre 0° et 115°. En fondant, son volume augmente brusquement, dans le rapport de 1 à 1,005, puis il se dilate régulièrement.

La cire blanche n'éprouve en fondant qu'un changement de volume insignifiant. L'*acide stéarique* fond, à 70°, en augmentant de volume dans le rapport de 1 à 1,11. La *stéarine* se dilate jusqu'à 50°, température à laquelle elle éprouve un changement d'état physique, signalé par M. Duffy, et son volume diminue brusquement dans le rapport de 1 à 0,977, puis elle se dilate jusqu'à son point de fusion ; à 60°, elle fond en augmentant de volume dans le rapport

de 1 à 1,0196. Ces 3 corps se dilatent irrégulièrement de 0° à leur point de fusion, puis régulièrement ; il en est de même des trois sels qui suivent.

Le *chlorure de calcium hydraté* fond à 29° en augmentant dans le rapport de 1 à 1,0965 ; le *phosphate de soude hydraté* à 35°, et l'*hypo-sulfate de soude hydraté* à 45°, en augmentant l'un et l'autre de volume dans le rapport de 1 à 1,051. Il est à remarquer que l'eau contenue dans ces sels ne leur donne pas la propriété de se contracter comme la glace, en se liquéfiant. M. H. Kopp a trouvé, pour la contraction de la glace, le rapport de 1 à 0,814, nombre qui diffère sensiblement du résultat trouvé par M. Dufour.

L'alliage de H. Rose (2 parties de bismuth, 1 de plomb, 1 d'étain) présente une particularité curieuse. Il présente, vers 60°, un maximum de dilatation, puis il se contracte jusqu'à 95°, fond et éprouve une augmentation très rapide, mais non subite, de volume ; puis la dilatation est uniforme et à peu près la même qu'à l'état solide avant 60°. En étudiant la mesure des chaleurs latentes, nous verrons d'autres propriétés singulières de certains alliages.

Les résultats obtenus par M. H. Kopp sur l'alliage de H. Rose et sur le phosphore avaient été antérieurement trouvés par M. G. A. Ermann, par un procédé tout différent[1]. Il pesait le phosphore dans l'eau, et l'alliage dans l'huile d'olive, à différentes températures ; ces corps étaient placés dans une petite cuvette en verre mince suspendue à la balance. La dilatation du verre et celle du liquide étaient évaluées avec soin dans chaque expérience.

921. Solidification brusque. — Quand un liquide se solidifie lentement, ses molécules s'arrangent régulièrement et forment des cristaux qui s'entre-croisent dans tous les sens. Mais quand on a fait passer brusquement un liquide à une température de beaucoup inférieure à son point de solidification, ses molécules prennent, sous l'influence de cette basse température, un arrangement particulier qui paraît moins régulier, et les propriétés du solide qui prend naissance ne sont pas les mêmes que lorsque la solidification se fait lentement, et que les molécules peuvent obéir aux forces qui les sollicitent, telles qu'elles sont à la température du point de passage. Par exemple, le verre jeté en gouttes pâteuses dans l'eau froide donne les *larmes bataviques* dont nous avons décrit les propriétés singulieres (I, 463). La fonte de fer solidifiée brusquement donne la fonte blanche, et refroidie lentement, la fonte grise (I, 461). On ne doit pas être surpris de ces différences dans le mode d'agrégation des molécules, quand on se rappelle que les corps solides présentent, sans changement d'état, des phénomènes analogues, comme le montre l'opération de la *trempe*.

[1] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. XL, p. 197.

III. Liquéfaction par dissolution.

922. Le passage à l'état liquide peut s'effectuer sans l'intervention de la chaleur : quand un corps solide est mis en contact avec un liquide, il arrive souvent qu'il disparaît en prenant lui-même la forme liquide ; on dit qu'il s'est dissous. C'est ce qui a lieu pour le sucre, le sel, dans l'eau ; l'or, l'argent, dans le mercure.

Ce phénomène est souvent précédé d'une combinaison, que contracte le corps solide avec le dissolvant ; de sorte que ce n'est plus le corps solide employé qui se dissout, mais bien la combinaison qu'il a d'abord formée avec le liquide.

Quand une semblable combinaison se fait, il peut y avoir élévation de température, et le liquide combiné est en proportion définie : comme dans les hydrates d'oxydes, les combinaisons de l'eau et de certains sels, etc. Quand, au contraire, il ne se forme pas de combinaison, ou bien quand elle est formée d'avance, le phénomène de la dissolution est accompagné d'un refroidissement dû à une absorption de chaleur latente. Par exemple, quand on dissout de l'azotate d'ammoniaque dans l'eau à 0°, la température s'abaisse jusqu'à —26°, et l'on utilise le froid ainsi obtenu, pour faire de la glace. Si l'on jette dans du mercure, des fragments de plomb, de bismuth et d'étain, ils se dissolvent, et la température s'abaisse de 15 ou 20°. Cette absorption de chaleur montre qu'il y a une grande analogie entre la liquéfaction par dissolution et la liquéfaction par la chaleur, analogie confirmée par ce fait que la capacité calorifique des sels dissous est celle qu'ils présentent à l'état liquide (894).

État de saturation. — Une quantité déterminée d'un liquide ne dissout pas ordinairement une quantité indéfinie de la substance donnée ; il arrive un moment où ce liquide refuse d'en prendre davantage, on dit qu'il est *saturé*. La quantité maximum de substance dissoute dépend en général de la température, et augmente avec elle, tantôt proportionnellement à son accroissement, comme pour les sels peu solubles, tantôt beaucoup plus rapidement, comme pour les sels très solubles dans l'eau. Gay-Lussac a mesuré la solubilité d'un certain nombre de sels à des températures croissant graduellement : pour connaître la quantité de sel dissoute, il pesait dans un matras une portion de la dissolution, et, faisant évaporer le liquide, puis chauffant presque au rouge, il mesurait le poids de la quantité de sel déposé.

La méthode graphique est commode pour se rendre compte des résultats ; on prend les températures pour abcisses et les ordonnées pour représenter les quantités de sel qui saturent l'eau. Pour les sels peu solubles, comme le chlorure de barium, le chlorure de potassium, le sulfate de potasse, etc., on obtient une ligne droite ; et dans le cas des sels très solubles, comme l'azotate de potasse, l'azotate de baryte, le chlorate de potasse, une courbe convexe vers l'axe des abcisses.

Il y a des sels qui offrent cela de particulier, que leur solubilité augmente jusqu'à une certaine température, pour diminuer ensuite : tel est le sulfate de soude, dont le maximum de solubilité est à 33°, et qui possède le même degré de solubilité à 30° et à 100°. Pour le sulfate de chaux, le maximum est à 35°. Cette anomalie apparente provient de ce que la quantité d'eau combinée change avec la température, et est d'autant plus faible, en général, que la température est plus élevée. Ce n'est donc pas, en réalité, le même corps qui est dissous dans l'eau froide et dans l'eau chaude. C'est ainsi que le sulfate de soude ne contient pas d'eau combinée quand il cristallise à 33°, tandis qu'à des températures inférieures, il en contient. Enfin, il y a des sels dont la solubilité ne change pas avec la température; par exemple le sel marin.

Quand l'eau contient des sels dissous, son point de congélation s'abaisse ; ainsi, l'eau de mer se congèle à une température plus basse que l'eau douce. L'abaissement est sensiblement proportionnel à la quantité de sel dissous.

Pendant la congélation, l'eau tend à se séparer du sel ; de sorte que la glace formée est composée d'eau presque pure. Ainsi, en colorant avec de la teinture de tournesol une dissolution étendue de sel marin, que l'on expose à l'action du froid, on voit la teinte bleue diminuer à la périphérie et augmenter au milieu de la masse, et bientôt on trouve une enveloppe de glace renfermant une dissolution saturée. On tire parti de cette propriété, dans les pays du Nord, pour concentrer l'eau de mer dont on veut extraire le sel.

923. Retour de la substance dissoute à l'état solide. — Quand on abandonne à l'évaporation spontanée, ou bien quand on laisse refroidir lentement une dissolution faite à chaud, la dissolution, supposée saturée, laisse déposer la substance dissoute, sous forme de cristaux qui se montrent à la surface, et sur les parois du vase, principalement sur les aspérités qu'elles peuvent présenter. Les molécules qui se séparent de la dissolution ont une tendance marquée à se déposer sur les cristaux déjà formés, et aussi sur des cristaux isomorphes de substance différente qu'on peut y plonger. Cet effet moléculaire est tellement prononcé, que, si plusieurs sels sont dissous dans le même liquide, on peut les faire déposer séparément sur des cristaux de leur espèce. Par exemple, si l'on plonge dans une dissolution de 2 parties de nitre et de 3 de sulfate de soude dans 5 parties d'eau tiède, un cristal froid de nitre, on voit le nitre de la dissolution se déposer sur lui; tandis que si l'on employait un cristal de sulfate de soude, le sulfate de soude de la dissolution se déposerait seul sur lui. Nous avons vu la glace exercer sur l'eau à 0° une action moléculaire analogue (918). En se servant de cette propriété, on peut obtenir de gros cristaux, avec de petites quantités de dissolution que l'on renouvelle continuellement; le cristal que l'on veut *nourrir* est retourné de temps à autre, de manière à s'appuyer successivement sur ses différentes faces.

Eau de cristallisation. — Il y a des sels qui, en cristallisant, emportent avec eux de l'eau combinée qu'on nomme *eau de cristallisation*, et qui est

nécessaire à la forme et à la transparence des cristaux. Cette quantité d'eau est en proportion définie. Certains sels peuvent en prendre différentes proportions, comme l'ont constaté M. Haidinger, puis M. Mitscherlich. En général, cette quantité d'eau est d'autant plus grande que la cristallisation se fait à une température plus basse. Le séléniate de zinc peut prendre ainsi trois proportions différentes d'eau de cristallisation. A chaque proportion correspond une forme cristalline particulière; ce qui ne doit pas étonner, puisque ce sont en réalité des substances différentes qui cristallisent. Nous avons vu que cette eau, d'après sa capacité calorifique, semble être à l'état solide (894).

La chaleur fait disparaître l'eau de cristallisation. Quelquefois cette eau est en assez grande abondance pour que le sel s'y dissolve; on dit alors qu'il éprouve la fusion aqueuse. M. Legrand a remarqué que la température à laquelle bout une dissolution saturée d'un sel, suffit pour lui enlever son eau de cristallisation. Une température plus basse peut, du reste, produire le même effet, il y a même des sels qui abandonnent leur eau combinée, à la température ordinaire. Ils perdent alors leur transparence, et tombent en poussière; ils sont dits *efflorescents*.

Abaissement de la température au-dessous du point de saturation. — Une dissolution saturée peut être *sursaturée* sans déposer de cristaux. Par exemple, une dissolution de sulfate de soude ou de carbonate de soude peut ainsi être refroidie, sans cristalliser, beaucoup au-dessous de la température à laquelle elle est saturée; l'immersion d'un cristal de sel détermine aussitôt la cristallisation, et *la température remonte subitement au point qui correspond à la saturation*. Il y a certaines circonstances qui favorisent singulièrement la production du phénomène. Supposons qu'on prenne une dissolution saturée de sulfate de soude, renfermée dans un réservoir de verre terminé par un tube effilé qu'on ait fermé à la lampe pendant l'ébullition, de manière qu'il n'y ait pas d'air : le refroidissement ne fait pas cristalliser le sel; mais si l'on vient à briser le tube, la cristallisation se fait tout à coup, et il y a dégagement de chaleur qui, de latente devient sensible. On serait tenté d'attribuer ce résultat à la pression de l'air; mais, si au lieu de fermer le tube on se contente de mettre sur la dissolution une couche d'huile ou d'essence de térébenthine, comme l'a fait Gay-Lussac, la cristallisation n'a pas lieu, tandis qu'on la produit de suite en insufflant de l'air à travers la couche d'huile. Il faut donc attribuer la cristallisation au contact de ce gaz. L'oxygène possède à un haut degré la propriété de provoquer la cristallisation, tandis que l'azote ne peut la produire. La sursaturation n'est pas en rapport avec l'affinité du sel pour son dissolvant, car des sels ayant peu d'affinité pour l'eau peuvent se sursaturer bien plus facilement que d'autres qui ont pour ce liquide une grande affinité. On était porté à croire que ce phénomène était un effet de l'inertie des molécules, parce que l'on croyait qu'un repos complet était indispensable, et qu'il fallait aussi que la surface du vase fût dépourvue d'aspérités. Mais si ces conditions

sont souvent nécessaires, cependant la cristallisation peut ne pas se faire, quoiqu'elles ne soient pas remplies. Ainsi, M. H. Lœwel a vu des dissolutions de sulfate de soude hydraté rester sursaturées dans des tubes scellés, quand il les agitait, l'intérieur contenant même des fragments de verre brisé. Il est bien difficile d'invoquer ici l'inertie des molécules. Voici encore un fait tout aussi inexplicable : une dissolution bouillante de sulfate de soude est versée dans un verre, et abandonnée au refroidissement dans un lieu bien tranquille ; souvent elle ne cristallise pas ; et si alors on la touche avec une baguette de verre, les cristaux se montrent aussitôt. Mais si la baguette a été chauffée dans la flamme d'une lampe à alcool, quand elle est refroidie, elle reste incapable pendant plusieurs semaines de provoquer la cristallisation par son contact; tandis que l'extrémité qui n'a pas été chauffée la produit facilement.

Changement de volume. — Quand un sel cristallise, il y a, le plus souvent, augmentation de volume. Ce fait est bien connu pour le sulfate de soude, et la force expansive de ce sel, au moment où il cristallise, a été mise à profit, par M. Brard, pour reconnaître les pierres gélives : il trempe un fragment dans une dissolution saturée à chaud de sulfate de soude, et il observe si la pierre se fendille pendant la cristallisation. Quelquefois l'expansion qu'éprouve un sel en cristallisant ne s'aperçoit pas, parce que le liquide qui se refroidit diminue en même temps de volume ; de sorte que, si sa contraction est plus grande que l'expansion du sel, il y a, en apparence, diminution de volume. M. Longchamp a pu reconnaître une expansion dans la cristallisation du nitrate de soude, du chlorure de potassium, du salpêtre, etc., en comparant l'abaissement du niveau d'une dissolution qui cristallise dans un matras portant un long col gradué, à l'abaissement de niveau qu'éprouve par le refroidissement et dans un autre matras, une portion de la dissolution qui a déposé son sel. Le sulfate de cuivre, le sulfate de soude manifestent une élévation de niveau ; le nitrate de baryte, qui est anhydre, se dilate de près de 18 pour cent, ou à peu près deux fois et demi autant que l'eau qui se congèle. Le sulfate d'ammoniaque, au contraire, éprouve une contraction réelle de 95 pour cent.

924. Chaleur latente de dissolution et de dilution. — Nous verrons plus loin comment on mesure la chaleur latente de fusion des corps. Il serait important de la comparer à celle qui est nécessaire pour les dissoudre. Mais ici se présente une difficulté : l'action chimique qui accompagne la dissolution, dégageant de la chaleur, il semble naturel d'admettre qu'il faut autant de chaleur pour faire passer un corps à l'état liquide, par fusion ignée que par l'action d'un dissolvant ; de sorte que l'on devrait trouver des nombres moindres pour la chaleur enlevée par dissolution, à cause de l'action chimique. M. Person a trouvé tout le contraire : ainsi, 1^{gr} d'azotate de potasse exige 49 calories pour se fondre, et 69 pour se dissoudre dans 5 parties d'eau. Si l'on vient à augmenter la quantité d'eau, il faut plus de chaleur encore : dans 20 parties d'eau, il faut 80 calories. On doit conclure de là qu'il y a absorption

de chaleur latente quand on ajoute de l'eau à une dissolution ; il y a donc un *calorique de dilution*, comme l'appelle M. Person, qui s'ajoute à la chaleur latente de fusion, et est absorbé par suite de l'écartement des molécules dissoutes quand on ajoute du dissolvant. Avec le sel marin, il disparaît plus de chaleur quand on étend la dissolution que pendant qu'elle se fait. La chaleur enlevée par dilution l'emporte aussi, chez les sels qui ont peu d'affinité pour l'eau, comme l'azotate de potasse. Si l'action chimique est prononcée, la chaleur qu'elle produit peut l'emporter sur celle qui est enlevée par dilution, comme chez le chlorure de calcium, qui exige 41 calories pour fondre, et 20 seulement pour se dissoudre. Entre ces extrêmes, il faut citer le phosphate de soude, qui demande le même nombre de calories pour se fondre et se dissoudre, la dilution et l'action chimique se compensant exactement.

925. Mélanges frigorifiques — C'est principalement à l'absorption de la chaleur par dissolution, que l'on a recours pour produire artificiellement du froid Les *mélanges frigorifiques* ou *réfrigérants* dont on se sert dans ce but, sont formés de plusieurs substances, *dont une au moins est solide*, et qui peuvent se combiner spontanément, de manière à donner naissance à un composé liquide. L'action chimique qui se produit est accompagnée d'un dégagement de chaleur; il faudra donc, pour obtenir un abaissement de température, que la quantité de chaleur absorbée par le passage de la substance solide à l'état liquide soit plus grande que celle que dégage l'action chimique. Par exemple, si l'on mêle une partie d'acide sulfurique concentré avec quatre parties de glace, ces deux corps s'unissent en formant une combinaison liquide, et la température descend à — 20°, parce que la glace absorbe en passant à l'état liquide, non seulement toute la chaleur dégagée par l'action chimique, mais encore une partie de la chaleur sensible du mélange. Si, au contraire, on mêle 4 d'acide avec 1 de glace, on obtient une élévation de température de 50 à 60°, parce que la petite quantité de glace qui devient liquide n'absorbe qu'une partie de la chaleur de combinaison.

C'est aux académiciens de Florence que sont dûs les premiers essais sur les mélanges réfrigérants. Fareinheit, de Mairan, et surtout Réaumur, s'en sont occupés ensuite. Ce dernier a fait connaître, dans les Mémoires de l'Académie des sciences de Paris pour 1734, de nombreuses expériences sur le froid produit par les mélanges de divers sels et acides avec la glace.

Voici les principaux mélanges réfrigérants employés :

SUBSTANCES.	PARTIES.	ABAISSEMENT à partir de 10°.	FROID produit.
Mélanges d'eau et de sels.			
Eau	1	—16°	26°
Azotate d'ammoniaque	1		
Eau	1	—19	29
Azotate d'ammoniaque	1		
Sous-carbonate de soude	1		
Eau	16	12	22
Azotate de potasse	5		
Chlorhydrate d'ammoniaque	5		
Eau	16	—16	26
Chlorhydrate d'ammoniaque	5		
Azotate de potasse	5		
Sulfate de soude	8		
Eau	4	»	15
Chlorhydrate de potasse	57		
Chlorhydrate d'ammoniaque	32		
Azotate de potasse	10		
Mélanges de glace et de sels.			
Neige ou glace pilée	2	»	20
Sel marin	1		
Neige ou glace pilée	24	»	28
Sel marin	10		
Chlorhydrate d'ammoniaquo	5		
Azotate de potasse	5		
Neige ou glace pilée	2	»	18
Chlorure de calcium	3		
Neigo ou glace pilée	5	»	25
Sel marin	2		
Chlorhydrate d'ammoniaquo	1		
Neige ou glace pilée	12	»	31
Sel marin	5		
Azotate d'ammoniaque	5		
Neige ou glace pilée	3	»	18
Potasse	4		
Mélanges de sels et d'acides étendus d'eau.			
Sulfate de soude	3	—19°	29
Acide azotique	2		
Sulfate de soude	6	—23	33
Chlorhydrate d'ammoniaque	4		
Azotate de potasse	2		
Acide azotique	4		
Phosphate de soude	9	—29	39
Acide azotique	4		
Sulfato de soude	6	—26	36
Azotate d'ammoniaque	5		
Acide azotique	4		
Sulfate de soude	20	—8,15	18,15
Acide sulfurique à 36°	16		
Sulfate de soude	8	—17	27
Acide chlerhydrique	5		

Les mélanges que l'on emploie le plus souvent sont ceux de glace et de sel marin, d'eau et d'azotate d'ammoniaque, de sulfate de soude et d'acide chlorhydrique. Après l'opération, on retrouve le sel des deux premiers par l'évaporation au soleil ou sur le feu : et le sel du dernier, en distillant le mélange dans un alambic en verre, ce qui permet de recueillir l'acide.

Le froid produit par les mélanges frigorifiques a nécessairement une limite, car l'action chimique qui détermine la liquéfaction du sel cesse d'avoir lieu quand la température est trop basse ; et même, à cette température, le sel se séparerait de la dissolution, si elle était faite d'avance. Pour obtenir le maximum de froid, il faut employer les sels en poudre fine, bien secs, mais contenant cependant toute leur eau de cristallisation, et faire le mélange peu à peu en agitant continuellement. Il faut aussi que le vase dans lequel on opère et les substances que l'on mêle, soient d'avance à une basse température. Quelquefois on refroidit préalablement ces substances dans un premier mélange frigorifique. On doit enfin prendre toutes les précautions possibles pour éviter la communication de la chaleur extérieure ; et pour cela, on entoure souvent le vase dans lequel on fait le mélange, de plusieurs enveloppes concentriques.

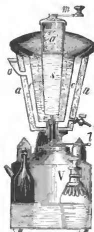


Fig. 675.

Dans le *congélateur Villeneuve* (*fig.* 675), il y a trois enveloppes ; entre l'enveloppe extérieure *aa* et la suivante, se trouve un corps mauvais conducteur ; dans l'espace *cc*, on met de l'eau ou de la glace. La substance à congeler est placée dans un vase en étain *s* nommé *sorbetière* ou *sarbotière*, plongé dans le mélange qui remplit le vase intérieur. Le couvercle de ce vase renferme des matières non conductrices *a'*, et porte une manivelle *m* destinée à le faire tourner ; il est muni d'ailettes obliques qui agitent le mélange. Quand ce mélange a perdu son efficacité, on ouvre la soupape *r* au moyen du levier *l*, et le liquide tombe dans le vase *v*, où il sert à rafraîchir les boissons.

Les mélanges frigorifiques les plus puissants sont formés avec l'acide carbonique solide. La température de ce corps, à l'air libre, descend à près de —80°. En y mêlant de l'éther, qui le rend bon conducteur, on forme une pâte frigorifique qui a été employée à liquéfier et congeler divers gaz. En ajoutant du protoxyde d'azote liquide à cette pâte, on forme le mélange frigorifique le plus énergique que l'on connaisse. Ce mélange est capable d'amener l'alcool à un état de consistance telle qu'on peut renverser le vase qui le contient, sans que l'alcool s'en échappe.

IV. Mesure de la chaleur latente de liquidité.

926. On croyait autrefois que la température de la fusion d'un corps une fois atteinte, une légère addition de chaleur devait faire tout fondre à la fois, en rompant l'équilibre des molécules. Mais l'expérience montre que la fusion se fait graduellement. Les académiciens de Florence avaient vu la glace conserver une température fixe pendant sa fusion dans un vase entouré d'eau bouillante. Fareinheit avait vu l'eau portée au-dessous de 0° remonter subitement à 0° en se congelant, expérience que de Mairan a beaucoup variée en discutant l'opinion, alors très répandue, que le point de fusion était variable. Béaumé vit le premier l'eau entourée d'un mélange réfrigérant conserver une température fixe pendant sa congélation, d'où il conclut qu'il y a de la chaleur dégagée dans le passage d'un état à l'autre.

Le docteur Black, en 1762, ayant réuni tous ces faits, distingua la chaleur *latente* et la chaleur *sensible*. Il fit aussi l'expérience suivante, attribuée quelquefois à Wilcke : ayant mêlé des poids égaux d'eau chaude et de glace, il trouva que la température était de beaucoup au-dessous de la moyenne. Des expériences faites sur les métaux, et sur les sels, particulièrement, par Landriani, ont permis d'étendre ces résultats aux autres corps.

Mesure de la chaleur latente de la glace. — Aussitôt que Black eut découvert la chaleur latente de fusion, il chercha à la mesurer. Pour cela, il suspendit, dans une chambre à 18°, deux ballons égaux en verre mince, l'un rempli d'eau à 0°, l'autre de glace fondante. Au bout d'une demi-heure, l'eau atteignit la température de 4°,44, tandis que l'eau provenant de la fusion de la glace dans l'autre ballon, n'arriva à cette température qu'au bout de dix heures et demie; et comme la chaleur lui était fournie à peu près aussi rapidement, Black en conclut qu'il avait dû en absorber vingt-une fois plus que l'eau, c'est-à-dire une quantité égale à $21 \times 4 = 84$ calories. Il y eut donc 80 calories d'absorbées dans la fusion de la masse de glace, qui demeurèrent dans l'eau produite. Il est bien remarquable que ce nombre diffère à peine de celui que l'on a obtenu par les mesures les plus exactes. — Black a encore opéré en portant l'eau au-dessous de 0°, et cherchant le poids de la masse de glace formée au moment où elle se congelait subitement. L'équation du n° 916 donne alors la valeur de l, c'est-à-dire le nombre de calories nécessaire pour fondre l'unité de masse de glace.

Enfin, Black a employé la méthode des mélanges : il plongea dans un poids connu d'eau chaude, un certain poids de glace à 0° ; cette glace fondit, et il observa la température finale θ du mélange. En appelant t la température de l'eau, P son poids et celui du vase en eau, p le poids de la glace et l sa chaleur latente de fusion, on a, pour déterminer l, l'équation $tp + p\theta = P\,(t - \theta)$,

qui exprime que la quantité de chaleur lp absorbée par la glace pour se fondre, plus celle, $p\theta$, qu'absorbe l'eau de fusion pour passer de 0° à θ°, est égale à la quantité que perd le poids P d'eau en s'abaissant de t° à θ°.

Wilcke opérait en plongeant dans l'eau bouillante deux vases de verre, l'un rempli d'eau, l'autre de neige, à 0°, et il comparait les températures du liquide qu'ils contenaient quand la température de l'eau chaude était descendue à 72 degrés.

Lavoisier et Laplace introduisaient dans leur calorimètre (888) un vase plein d'eau chaude, et cherchaient le poids de glace fondue quand cette eau était à 0°. L'équation s'établissait comme ci-dessus.

La moyenne des résultats trouvés par Black, Lavoisier et Laplace, Wilcke et Cavendish, est de 75 calories; d'où il résulterait qu'en mêlant des poids égaux, d'eau à 75° et de glace à 0°, toute la glace devrait fondre, et le liquide se trouver à 0°. Mais nous allons voir que le nombre 75 est trop faible.

927. Nouvelles évaluations de la chaleur latente de la glace. — MM. de la Provostaye et P. Desains[1] ont cherché la chaleur latente de fusion de la glace par la méthode des mélanges. Le calorimètre, en laiton très mince, était pesé avec l'eau qu'il contenait, puis placé sur trois cônes en bois. Pendant qu'un des observateurs suivait la température du thermomètre, l'autre essuyait, entre plusieurs doubles de papier Joseph, un morceau de glace à 0°, et l'introduisait dans le calorimètre au moment où le premier notait la température, indiquée en centièmes de degrés; puis, il suivait la marche descendante du thermomètre, tout en agitant le liquide, et il indiquait chaque degré dans les premiers moments, chaque fraction de degré quand le refroidissement se ralentissait, pendant que l'autre observateur notait, sur un chronomètre, les temps correspondants. Après avoir observé la température finale du calorimètre, on le pesait, et l'augmentation de poids représentait le poids de la glace. Au moyen de la série observée des températures décroissantes, on calculait la perte de chaleur due au rayonnement (887). On tenait compte aussi de la perte de poids due à l'évaporation d'une petite quantité d'eau. MM. de la Provostaye et P. Desains ont trouvé ainsi, pour la chaleur latente de la glace, le nombre 79,25.

M. Regnault, à peu près à la même époque, est arrivé au même résultat, en employant tantôt de la neige bien sèche, tantôt de la glace fondante qu'il introduisait dans un calorimètre en laiton très mince, posé sur trois pointes en bois dans un deuxième vase en cuivre lui servant d'enveloppe. Ce vase était muni de tiges métalliques fixées sur le fond, à l'extérieur, et se joignant en dessus à un anneau destiné à suspendre tout le système sous la balance.

Calorimètre compensateur de M. Person. — Une des corrections les plus délicates dans ces sortes d'expériences, est celle qui est relative à la chaleur que perd le calorimètre. M. Person[1] a imaginé de supprimer cette

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XXVII, p. 250.

perte de chaleur presque totalement, en maintenant autour du calorimètre une enceinte ayant à chaque instant la même température que lui. Cette enceinte est formée d'un vase en fer-blanc A (*fig.* 676) à double paroi, séparé du calorimètre par un espace de 2 centimètres, rempli d'air. L'intervalle entre les deux parois de l'enceinte est rempli d'eau qu'on porte à la température que l'on veut, au moyen d'un vase extérieur V à moitié plein d'eau chaude, et qui peut monter et descendre, de manière à envelopper d'eau chaude une portion plus ou moins grande de l'enceinte. Le vase V passe à travers une ouverture pratiquée dans la table qui porte tout l'appareil; on le soulève ou on l'abaisse au moyen d'une crémaillère placée en dessous, et mise en mouvement par un pignon denté, disposé comme celui d'un cric. Dans l'enceinte et dans le calorimètre, sont des agitateurs suspendus aux cordons c, c', et mus régulièrement par un mouvement d'horlogerie. On reconnaît à chaque instant si la température de l'enceinte est égale à celle du calorimètre, au moyen d'un thermomètre différentiel D, dont un des réservoirs, très allongé, plonge dans le calorimètre, tandis que l'autre s'enfonce dans l'enceinte et en occupe toute la profondeur. En soulevant avec précaution le vase V, on maintient l'index du thermomètre différentiel dans une position fixe. L'index devrait être maintenu au zéro, s'il n'y avait pas de perte de chaleur par le couvercle du calorimètre. Pour compenser cette perte, on tient la température un peu plus élevée dans l'enceinte que dans le calorimètre ; la différence est donnée par des expériences préalables, qui consistent à maintenir le calorimètre, rempli d'eau chaude, à une température rigoureusement fixe donnée par le thermomètre *t*, et à observer quelle position a alors l'index, pour chaque température fixe du calorimètre, ou plutôt pour chaque excès de sa température sur celle du milieu ambiant, pour que le thermomètre *t* ne varie pas. On dresse ainsi une table qui indique la position de l'index pour chaque excès. Les excès successifs sont donnés par un second thermomètre différentiel *d*, dont l'un des réservoirs plonge dans le calorimètre, tandis que l'autre *r*, plonge dans un vase plein d'eau à la température de l'air ambiant. Quand le calorimètre est plus froid que l'air, il est évident qu'il faut que la température de l'enceinte A soit un peu plus basse que la sienne.

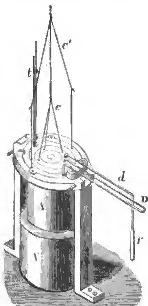


Fig. 676.

M. Person a mesuré, par ce moyen, la chaleur latente de la glace prise à

une température inférieure à 0° ; il fallait tenir compte de la chaleur absorbée par la glace, pour s'échauffer d'abord jusqu'à zéro. Il a reconnu ainsi qu'il y a deux calories d'absorbées pour la faire passer de —2° à 0°, ce qui fait une calorie de plus que la quantité de chaleur qui correspond à la capacité de la glace, qui est à peu près 0,5. Cet excès de chaleur absorbée provient d'un ramollissement préalable qui précède le passage à l'état liquide, et qui exige l'absorption d'une certaine quantité de chaleur. Le ramollissement ne commence qu'à — 2°, car si l'on part d'une température plus basse, on trouve toujours la même valeur pour la chaleur latente. En tenant compte de cette circonstance, la fusion d'un gramme de glace exige 80 calories ; c'est là, d'après M. Person, la véritable chaleur latente de fusion de la glace. Le nombre 79,25 suppose que l'on part de 0°, et que l'on ne tient pas compte de la chaleur nécessaire pour produire le ramollissement préalable.

Quand l'eau se refroidit, elle abandonne aussi de la chaleur latente, dans le voisinage du maximum de densité; car M. Ermann a reconnu que le refroidissement de l'eau dans l'air au-dessous de zéro, se ralentit notablement entre 4°,5 et 3°.

928. Chaleur spécifique de la glace. — Les expériences qui précèdent exigent que l'on connaisse la chaleur spécifique de l'eau à l'état solide. On a fait un grand nombre d'expériences pour déterminer cet élément. Clément et Désormes ont employé deux méthodes qui supposent connue la chaleur latente de fusion ; dans l'une, ils plongent dans de l'eau à 0° un poids connu de glace à $-t°$. Cette glace enlève de la chaleur à l'eau qui l'entoure, et son poids augmente par le dépôt de couches de glace provenant de ce liquide, jusqu'à ce que la température de la glace employée soit remontée à 0°, par l'abandon de la chaleur latente de l'eau congelée. La chaleur spécifique c de la glace est alors donnée par l'équation $ctP = pl$, dans laquelle P est le poids de la glace employée, p celui de la glace formée, et l sa chaleur latente.

L'autre méthode consiste à plonger dans de l'eau chaude, de la glace à $-t°$. Si T est la température de cette eau, p son poids et θ la température finale quand toute la glace est fondue, on a, pour déterminer c, l'équation $p(T-\theta) = P(ct + l + \theta)$, qui exprime que la quantité de chaleur perdue par le calorimètre est égale à celle que la glace a absorbée pour passer de $-t°$ à 0°, plus celle qu'elle a absorbée pour se fondre, augmentée enfin de celle que l'eau de fusion a dû prendre de 0° à $\theta°$.

M. Person a repris ces expériences par trois méthodes différentes ; les deux premières sont celles que nous venons d'indiquer, et il a reconnu que la première conduit à des résultats erronés, car il se forme indéfiniment de la glace (916) ; de sorte que le poids de la masse congelée est d'autant plus grand que l'expérience dure plus longtemps. — La troisième consistait à observer le refroidissement occasionné par de la glace à $-t°$ dans un liquide où elle se réchauffait sans se fondre. La glace était contenue dans une bouteille cylindrique en cuivre très mince, dans laquelle on avait fait congeler de l'eau.

Un thermomètre à long réservoir était pris dans la glace. La bouteille était contenue dans un étui en cuivre mince fermé par un bouchon que traversait la tige du thermomètre; on la refroidissait à —20° dans un mélange de sel et de glace pilée, contenu dans un vase à plusieurs enveloppes, et continuellement agité. La bouteille était ensuite plongée dans le calorimètre, qui contenait, soit de l'eau salée, soit de l'essence de térébenthine, dont on avait déterminé d'avance la chaleur spécifique. Une correction était faite, à cause de la chaleur absorbée par la bouteille pendant qu'on la transportait du mélange réfrigérant dans le calorimètre. Cette correction était de 6 calories environ. M. Person a trouvé ainsi $c = 0,5$.

Ayant plus tard reconnu l'influence du ramollissement de la glace à partir de —2°, il reprit ces expériences, au moyen du calorimètre compensateur (*fig.* 675), en ayant soin que la température ne montât pas jusqu'à —2°, pendant l'expérience. Il trouva alors, pour la capacité de la glace entre —21° et —2°, le nombre 0,48, qui est sensiblement moindre que celui qu'on avait admis jusqu'alors, lequel était augmenté de la chaleur latente absorbée par l'effet du ramollissement entre —2° et 0°.

A peu près à la même époque, M. E. Desains faisait des expériences très soignées sur la capacité de la glace par la méthode des mélanges, soit en la faisant fondre dans un poids donné d'eau, soit en la laissant s'échauffer dans l'essence de térébenthine. Par le premier procédé, il a trouvé pour moyenne 0,513, et par le second, 0,46.

929. Applications. — La grande quantité de chaleur nécessaire à la glace pour se fondre, joue un très grand rôle dans la nature. Quand un froid intense fait geler les eaux des lacs et des rivières, leur température ne peut descendre au-dessous de 0°, tant que la congélation ne s'étend pas dans toute la profondeur. Il en résulte que le froid est moins vif dans le voisinage des grandes masses d'eau.—Des linges mouillés préservent de la gelée les substances organiques dont on les enveloppe, tant que l'eau qui les imprègne n'est pas complètement transformée en glace. Quand vient le dégel, la température de l'air, à une certaine hauteur, peut être de 10° au-dessus de celle de l'air inférieur, qui, étant en contact avec la glace fondante qui recouvre le sol, reste à zéro jusqu'à ce que tout soit fondu.

Dans l'hiver de 1740, qui fut très rigoureux, on construisit à Saint-Pétersbourg, avec les glaçons de la Newa, un palais d'une architecture élégante, de 56 pieds de long; on y donna des fêtes, sans que la chaleur accumulée au-dedans pût en faire fondre les murs. On fabriqua aussi, avec des blocs de glace, six canons avec leurs affûts, du calibre de 3 livres de poudre, et on lança des boulets de fer sans que le canon éclatât, quoique l'épaisseur des parois ne fût que de 4 pouces.

En Sibérie, on forme des carreaux de fenêtre avec des lames de glace. Le froid extérieur compense la chaleur intérieure, et les empêche de fondre.

930. Chaleur latente des métaux, etc. — Pour mesurer la chaleur latente de fusion des corps autres que la glace, on les fait fondre et l'on cherche la quantité de chaleur qu'ils abandonnent en se solidifiant. On emploie pour cela la méthode des mélanges. Soit, par exemple, p le poids d'un métal en fusion, P celui de l'eau et de l'équivalent en eau du calorimètre, dont la température est t, θ la température finale du mélange, c la chaleur spécifique du métal à l'état solide, et l sa chaleur latente; on aura, pour déterminer l, l'équation $lp + pc(T - \theta) = P(\theta - t)$, T étant la température de fusion du métal, température qu'il possède quand on le verse dans le calorimètre. Quand la substance est attaquée par l'eau, on la renferme dans un vase métallique dont on tient compte. Cette méthode présente de grandes difficultés dans la pratique, surtout quand T est très élevé, à cause de l'accroissement notable de température que prend le calorimètre, de la perte de chaleur qu'il éprouve alors par le contact du milieu ambiant, de la chaleur enlevée par la vapeur qui se dégage au moment du contact du corps en fusion, et enfin de la perte de chaleur qu'éprouve ce corps pendant qu'on le transporte dans le calorimètre. Aussi n'a-t-on possédé pendant longtemps que peu d'expériences sur ce sujet.

Rudberg, par la méthode du refroidissement, a cherché la chaleur latente de plusieurs métaux et alliages; il comparait le temps que mettait la température d'un creuset rempli de métal fondu à s'abaisser de 10°, le point de solidification étant compris entre ces dix degrés, au temps employé par le même creuset rempli de mercure, dans les mêmes conditions de température, de surface rayonnante et de milieu ambiant, pour se refroidir aussi de 10°. — M. Despretz a fait connaître, en 1840, les précautions multipliées qu'il faut employer dans la méthode des mélanges, pour arriver à des résultats exacts [1]; mais il n'a pas publié de résultats numériques. Enfin, on doit à M. E. Desains des recherches sur la chaleur de fusion du phosphore, et sur sa capacité calorifique à l'état solide et à l'état liquide.

931. Expériences de M. Person. — La science ne possédait qu'un petit nombre de données sur les chaleurs latentes de fusion, lorsque M. Person a publié les résultats d'expériences multipliées qui l'ont conduit à la découverte d'une loi remarquable, qui donne une relation entre la chaleur latente des corps et leur capacité calorifique à l'état solide et à l'état liquide [2]. Il lui a fallu, pour établir cette loi, déterminer la chaleur spécifique d'un grand nombre de substances sous un état qu'elles ne présentent pas habituellement.

Méthode d'expérience. — M. Person a adopté la méthode des mélanges. Son calorimètre consiste en un vase cylindrique en laiton très mince V (*fig.* 677), au fond duquel est fixé un trépied destiné à soutenir le corps plongé. Le thermomètre t indique la température du bain, dans lequel un mouvement

[1] *Comptes-rendus des séances de l'Académie des sciences* de Paris, t. XI.

[2] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XXI, XXII, XXVII.

d'horlogerie fait mouvoir régulièrement un agitateur annulaire, soutenu par trois cordons *e*, qui traversent un couvercle destiné à empêcher l'évaporation.

Le thermomètre *t* est muni d'un renflement, de manière à porter ses deux points fixes, tout en donnant des degrés de 15mm d'étendue environ (702). On corrigeait ses indications de l'erreur provenant de la partie non plongée (785); la correction était à peu près de $\frac{1}{100}$ de degré.

Pour avoir la température finale du calorimètre, on suivait la marche du thermomètre au moyen d'une lunette, à des instants très rapprochés. La température, au moment de l'immersion, était alors déduite avec une grande approximation, par interpolation ou par une construction graphique, de la série des températures observées.



Fig. 677.

Quand la variation de température est rapide, le thermomètre est toujours un peu en retard sur la température du bain; on mesurait, par des expériences préalables, l'étendue de ce retard, en introduisant un peu d'eau chaude dans le calorimètre, pendant que l'agitateur fonctionnait régulièrement, et observant le temps que mettait le thermomètre à prendre la température du bain. Ce temps était de 3 ou 4 dixièmes de minute. On faisait la correction relative à la perte extérieure du calorimètre. Plus tard, M. Person s'est servi avec avantage de son calorimètre compensé.

La substance que l'on voulait étudier était ordinairement renfermée dans une bouteille en cuivre mince, au milieu de laquelle se trouvait le réservoir d'un thermomètre. La température était portée au point voulu, dans une étuve à plusieurs enveloppes, ou dans diverses dissolutions bouillantes, dans lesquelles on plongeait la bouteille après l'avoir entourée d'un étui aussi en cuivre mince. Pour prendre la capacité à l'état liquide, on faisait en sorte que la substance en fusion se refroidît assez peu dans le calorimètre pour conserver l'état liquide.

932. Formule qui lie la chaleur latente aux chaleurs spécifiques. — Par diverses considérations théoriques, M. Person a été conduit à exprimer la chaleur latente de fusion par la formule :

$$l = (n + t)(C - c), \qquad [1]$$

dans laquelle *t* représente la température de fusion, C et *c* les chaleurs spécifiques à l'état liquide et à l'état solide, et *n* une constante. Cette formule exprime que *la chaleur latente de fusion est égale à la différence entre les chaleurs spécifiques sous les deux états, répétée autant de fois qu'il y a de degrés depuis le point de fusion jusqu'à n degrés au-dessous de zéro.* La constante *n* se détermine en portant dans la formule les quantités C, *c*, *l*, *t*, données par l'observation. Or, il résulte des expériences faites avec des substances non métalliques de

natures très diverses, que la valeur de n est la même pour toutes, et égale au nombre 160. Pour vérifier ce résultat, M. Person a calculé la chaleur latente au moyen de la formule $l=(160+t)(C-c)$; et il a trouvé des valeurs sensiblement égales à celles que donne l'expérience directe, comme on le voit dans le tableau qui suit :

SUBSTANCES.	POINT de fusion.	CHALEUR SPÉCIFIQUE		CHALEUR LATENTE	
		à l'état solide	à l'état liquide	trouvée.	calculée.
Eau	0°	0,504	1,0000	79,25	79,20
Phosphore	44,2	0,1788	0,2045	5,034	5,243
Soufre	115	0,20259	0,234	9,368	9,350
Nitrate de soude	310,5	0,27824	0,413	62,975	63,4
Nitrate de potasse	339	0,23875	0,33486	47,371	46,462

On voit qu'il y a un accord aussi satisfaisant que possible entre les résultats trouvés et ceux que donne la formule, surtout lorsqu'on se rappelle que les capacités, particulièrement celles des liquides, varient avec la température.

Variation de la chaleur latente avec la température. — Une autre circonstance qui vient confirmer la formule de M. Person, c'est qu'elle indique que la chaleur latente dépend de la température à laquelle se fait la solidification. Par exemple, si l'on amène de l'eau à $-10°$, et qu'alors on la fasse congeler, la chaleur latente dégagée ne sera pas de 79 calories; mais, d'après la formule, 74 calories, en y remplaçant C par 1, c par 0,5, et t par $-10°$. Or, c'est ce qui doit avoir lieu. En effet, pour transformer un gramme de glace à $-t°$, en eau à 0°, il faut lui fournir d'abord ct calories pour l'échauffer jusqu'à 0°, c étant la capacité de la glace; et pour fondre cette glace, il faut encore 79 calories, ce qui fait en tout $ct+79$. Maintenant, si nous voulons ramener cette eau à son état primitif de glace à $-t°$, il faudra évidemment lui enlever ce même nombre de calories $ct+79$. Si d'abord nous la refroidissons jusqu'à $-t°$, sans changement d'état, il y aura Ct calories d'enlevées, C étant la chaleur spécifique à l'état liquide. Si alors l'eau se congèle, elle devra abandonner le reste, c'est-à-dire $(ct+79)-Ct$. On aura donc, pour la chaleur latente à $-t°$,

$$l'=ct+79-Ct=79-t(C-c)=\left(\frac{79}{C-c}-t\right)(C-c),$$

qui rentre dans la formule générale, en donnant à t le signe qui lui convient.

Ce raisonnement suppose que la capacité à l'état liquide reste la même au-dessous du point de congélation. M. Person a vérifié ce résultat sur l'eau, en constatant que le refroidissement de ce liquide conserve sa régularité jusqu'à — 7° en passant par zéro, tout en restant liquide. Cette conclusion est confirmée par ce fait que la chaleur spécifique de l'eau salée reste la même au-dessus et au-dessous de zéro. Or, nous savons que sa valeur est la moyenne entre les chaleurs spécifiques de l'eau et du sel considérées séparément.

M. Person a encore vérifié la formule [1] sur le chlorure de calcium, le phosphate de soude et le nitrate double de soude et de potasse.

L'eau de cristallisation du phosphate de soude possède la même chaleur spécifique que la glace (846); de plus, elle a la chaleur latente que posséderait la glace isolée, à la température de congélation du sel. Le nitrate double de soude et de potasse fond à une température plus basse que les deux sels qui le composent quand ils sont séparés, et sa chaleur latente, obtenue en ajoutant les chaleurs latentes des deux sels, calculées au moyen de la formule pour la température de fusion du sel double, est d'accord avec la chaleur latente que donne l'expérience.

La cire, qui fond à 61°, a pour chaleur latente de fusion le nombre 42,3, tandis que la formule donne 15,6. Le spermaceti fond à 42°,7, et sa chaleur latente est 47,8, tandis que la formule donne 29,2. Ces anomalies proviennent de ce que ces corps se ramollissent beaucoup avant de fondre, et que leur chaleur latente de fusion est confondue avec la chaleur spécifique, dans une étendue trop considérable de l'échelle thermométrique pour qu'on puisse la mesurer avec quelque exactitude. Les métaux sont dans des conditions particulières que nous étudierons plus loin,

Sens physique de la formule. — La formule $(160+t)(C-c)=l$ peut s'écrire sous la forme $(160+t)c+l=(160+t)C$, qui exprime que *la quantité de chaleur qu'il faudrait enlever à une masse liquide à t° pour abaisser sa température à 160° au-dessous de zéro, peut se calculer comme si cette masse restait liquide et conservait sa même chaleur spécifique;* le second membre représente en effet la quantité de chaleur ainsi calculée. Par exemple, pour faire passer 1gr d'eau, de 0° à — 160°, il faudra lui enlever 160 calories, comme si elle restait liquide; en effet, $l+c\times 160$ représente la quantité de chaleur enlevée, calculée à la manière ordinaire : prenant $l=79,25, c=0,504$, on trouve 159,89, qui diffère à peine de 160. De même, pour faire passer 1gr de soufre de — 160 à + 140, ce qui fait un intervalle de 300°, il faudra $300\times 0,234 = 70,2$ calories, en calculant comme si le soufre restait toujours liquide avec la chaleur spécifique $C = 0234$. Or, si l'on calcule par la méthode ordinaire, en ajoutant à la chaleur absorbée depuis — 160° jusqu'au point de fusion, la chaleur latente de fusion et celle qui est absorbée depuis le point de fusion jusqu'à 140°, on trouve 70,7, qui ne diffère que de $\frac{1}{100}$ de la valeur trouvée de l'autre manière.

933. Du zéro absolu. — Remarquons que si, au lieu de partir de —160°, on partait de toute autre température, on ne trouverait plus cette égalité dans les résultats. Ce nombre 160 a donc, à ce point de vue, quelque chose de tout spécial, indépendamment de cette particularité que c'est la constante commune à toutes les substances, dans la formule. M. Person considère 160° comme représentant la température la plus basse possible, pour laquelle les corps ne posséderaient plus de chaleur, ou enfin comme indiquant le point du *zéro absolu*.

Pour connaître la quantité totale de chaleur x que contient un corps, il suffit de connaître son rapport r et sa différence d avec la quantité de chaleur inconnue y que renferme un autre corps, car on aura $x : y = r$, $x + y = d$, d'où l'on pourra tirer la valeur de x en éliminant y. Or, si le rapport des chaleurs spécifiques des deux corps était constant pour toutes les températures, ce rapport serait celui des chaleurs totales. Il est vrai que ce rapport varie; mais il varie assez peu pour que, si l'on calcule, en le supposant constant dans un intervalle de 300°, la chaleur contenue dans différents corps, l'erreur soit très petite. Par exemple, pour les substances contenues dans le tableau du n° 892, la plus grande erreur n'est que de 0,1 de la valeur véritable. En s'arrêtant à 200°, elle n'est plus que de 0,05. Cette erreur sera encore moindre au-dessous de zéro, puisque les variations des capacités sont le plus prononcées dans les hautes températures. Donc, en appelant c et c' les capacités des deux corps comparés, on aura sensiblement $x : y = c : c'$. Pour avoir une différence entre x et y, considérons l'eau et la glace; on a évidemment $x - y = l = 79$. La relation $x : y = c : c'$ s'applique encore dans le cas de l'eau et de la glace; car l'eau liquide conserve au-dessous de zéro la même chaleur spécifique, comme nous l'avons vu (929). D'ailleurs, on peut montrer directement que les quantités totales de chaleur contenues dans 1gr d'eau et dans 1gr de glace entre 0° et — 160° sont entre elles comme les capacités de l'eau et de la glace. En effet, ces quantités sont $160\,c + l$ et $160\,c$, c étant la capacité de la glace. Mais l'équation $(160 + t)(C - c) = l$ donne $160\,c + l = 160\,C$, quand on y fait $t = 0$, en représentant par C la capacité de l'eau; on a donc $160\,c : (160\,c + l) = c : C$. La proportionnalité se vérifie donc jusqu'à — 160°, et l'on peut admettre qu'il en est de même pour les températures qui en diffèrent peu. On a donc pour l'eau et la glace $x : y = c : c'$, $y - x = l$. Prenant $c = 0{,}5$, $c' = 1$, $l = 79{,}2$, on tire de ces deux égalités $x = 80{,}4$, et $y = 159{,}6$; ce qui montre que 1gr d'eau à 0° contient 160 calories environ, et 1gr de glace 80 calories.

Maintenant la relation $x : y = c : c'$ montre que, si x est la quantité totale de chaleur que contient un autre corps à 0°, et c sa capacité à l'état solide, on a $x = \frac{y}{c'}\,c = 160\,c$. Si donc on enlève à un corps pris à 0°, 160 fois la chaleur qui fait varier sa température de 1°, il ne contiendra plus de chaleur, c'est-à-dire qu'il sera au *zéro absolu*.

A ces développements, M. Person a ajouté un rapprochement remarquable : les espaces célestes, quand on retranche l'effet de la chaleur du soleil, doivent posséder une température très voisine du zéro absolu, car ils ne sont traversés que par des rayons qui, émanant d'astres extrêmement éloignés, sont excessivement faibles. Or, nous verrons que M. Pouillet a trouvé le nombre — 160° pour la température des espaces planétaires, quand on défalque l'effet de la chaleur solaire.

Il serait à désirer que l'on pût parvenir à obtenir une température de — 160° ; il est probable que les corps, s'il est vrai qu'ils puissent être complétement privés de chaleur, manifesteraient alors des phénomènes tout à fait imprévus, sous l'influence de la force unique de la cohésion. Les molécules arriveraient peut-être au contact, et l'on ne saurait prévoir ce qu'il en résulterait. On pourrait peut-être citer à cette occasion le phénomène d'explosion fulminante observé par M. Chenot sur de l'argent en poudre soumis dans une presse hydraulique à une compression de 300 atmosphères [1], d'autant plus que les effets de la compression sur les corps sont analogues à ceux que produit le refroidissement.

Remarques. — Il y a plus d'un demi-siècle que les physiciens ont tenté de calculer la quantité de chaleur contenue dans les corps. et la position du zéro absolu. Irwine, un des premiers, a cherché à résoudre le problème en admettant que les quantités de chaleur contenues dans la glace et dans l'eau sont entre elles comme leurs capacités calorifiques, et en supposant que la différence de ces capacités est égale à la chaleur latente ; ce qui est loin d'être vrai. Crawfort et Dalton s'occupèrent aussi de cette question. Clément et Désormes fixèrent le zéro absolu à — 267°, parce que les gaz se dilatant de $\frac{1}{267}$, si l'on abaissait leur température à — 267°, la contraction serait égale au volume, c'est-à-dire que ce volume n'existerait plus. D'un autre côté, si l'on échauffe un gaz à 267°, son volume devient double, et ils regardaient comme évident que la chaleur ajoutée était égale à celle qui existait dans le volume primitif.

Le beau travail de M. Person et les nouveaux résultats qu'il a trouvés sur cinq substances très différentes, ont appelé l'attention sur ces questions importantes. Mais doit-on voir dans la formule qu'il a établie l'expression d'une loi naturelle, ou une simple loi empirique n'ayant pas de sens physique ? C'est ce qui ne peut être décidé qu'après qu'on aura fait des observations sur un plus grand nombre de substances. Une circonstance tend à jeter des doutes dans l'esprit ; c'est que la capacité à l'état liquide, comme à l'état solide, change avec la température et varie très rapidement dans le voisinage du changement d'état, particulièrement pour les corps qui se ramollissent avant de fondre ; le passage d'une capacité à l'autre se fait donc d'une manière continue et non brusquement. Quelles capacités faudra-t-il adopter ? Il semblerait rationnel de prendre

[1] *Comptes-rendus des séances de l'Académie des sciences*, t. XL, p. 969 et 1230.

celles qui ont lieu près du passage d'un état à l'autre; mais c'est là précisément qu'il y a le plus d'incertitudes.

Nous allons voir que la formule ne s'applique pas aux métaux ; M. Person est parvenu à interpréter la distinction entre les métaux et les autres corps, en faisant intervenir la ténacité. Les nombres trouvés pour le brome et pour la naphtaline ne satisfont pas non plus à la formule ; mais nous allons voir qu'il suffit de leur reconnaître une certaine ténacité, pour que cette anomalie puisse s'expliquer dans la théorie de M. Person.

934. Chaleur latente des métaux et des alliages. — Les lois dont nous venons de nous occuper sont relatives aux corps non métalliques, et n'ayant qu'une faible ténacité. M. Person a mesuré les capacités à l'état liquide de plusieurs métaux et de divers alliages, dont les points de fusion sont bien déterminés. Voici d'abord le tableau des résultats qu'il a obtenus; les signes Bi, Pb, Sn représentent un atome de *bismuth*, de *plomb* et d'*étain*.

SUBSTANCES.	POINT de fusion.	CHALEUR SPÉCIFIQUE		CHALEUR latente.
		à l'état solide	à l'état liquide	
Étain	237°,7	0,05623	0,0637	14,252
Bismuth	266,8	0,0308	0,0363	12,640
Plomb	326,2	0,0314	0,0402	5,369
Zinc	415,3	0,09555	»	28,13
Cadmium	320,7	0,0642	0,0567	13,66
Argent	»	»	0,0570	21,07
Mercure	»	»	»	2,83
Alliage de Darcet (Bi^3, Pb^2, Sn^2)	96	0,0356	0,03895	4,496
Alliage de Rose (Bi^2, Pb, Sn^2)	94	0,049	0,04219	4,687
Alliage (Bi^3, Pb^2)	122,4	0,0317	0,03503	»
Alliage (Bi^3, Sn^4)	135,3	0,0450	0,04540	»

Il ressort de ce tableau que la capacité des métaux simples est à peu près la même à l'état liquide et à l'état solide, comme cela avait été observé déjà pour le mercure. Le petit excès qu'on observe à l'état liquide n'est pas plus prononcé que l'augmentation qu'éprouve, dans les hautes températures, la chaleur spécifique des métaux restant solides (892). Il résulte de là que la formule $(160 + t)(C - c) = l$ ne se vérifie pas ici, puisqu'on a sensiblement $C = c$. M. Person attribue cette égalité approchée, à l'état imparfait de liquidité des métaux fondus.

La chaleur latente des métaux varie cependant avec le point de fusion, car dans les alliages plus fusibles que les métaux qui les composent, la chaleur latente de ces métaux est celle qui convient à la température de fusion de

l'alliage, et elle peut se calculer au moyen de la formule, en admettant que, si la liquidité était aussi parfaite que celle de l'eau, cette formule serait vraie, c'est-à-dire qu'on aurait $\delta = C - c = \frac{l}{160 + t}$. Considérons, par exemple, l'alliage de Darcet (Bi^3, Pb^2, Sn^2), et représentons par δ', δ'', δ''' les valeurs de $C - c$ qui correspondent à un atome de bismuth, de plomb et d'étain. La chaleur latente de l'alliage sera $(160 + 96)\left(\frac{3\delta' + 2\delta'' + 2\delta'''}{3 + 2 + 2}\right) = 6,369$.

L'expérience donne 4,496; mais M. Person a reconnu que, pendant la formation de l'alliage, il se dégage à peu près 2 calories. En ajoutant cette chaleur perdue à 4,496, on retrouve sensiblement le nombre 6,369.

Relation entre la chaleur latente des métaux et leur élasticité. — Nous avons établi (852) que l'effort nécessaire pour écarter les molécules par traction, c'est-à-dire le coefficient d'élasticité, est d'autant plus petit que le coefficient de dilatation est lui-même plus grand, c'est-à-dire que les molécules sont plus facilement écartées par la chaleur. Guidé par des considérations du même ordre, M. Person remarque que le travail accompli par la chaleur pour fondre un métal, c'est-à-dire pour séparer les molécules qui adhèrent fortement ensemble, doit être d'autant plus grand, et par conséquent exiger d'autant plus de chaleur, que la ténacité est elle-même plus grande; il a été conduit ainsi à la loi suivante : *les chaleurs latentes de fusion des métaux sont sensiblement proportionnelles aux coefficients d'élasticité*. Cependant la proportionnalité n'est qu'approchée, ce qui tient en partie à ce que, dans la mesure du coefficient d'élasticité, on ne compare pas des poids égaux, comme dans celle des chaleurs latentes. D'ailleurs, la chaleur latente doit être proportionnelle, non au coefficient d'élasticité, mais à une fonction de ce coefficient représentant le travail nécessaire pour vaincre la cohésion des molécules comprises dans l'unité de poids. En partant de là, M. Person exprime ainsi le rapport entre les chaleurs latentes :

$$l : l' = K\left(1 + \frac{2}{\sqrt{d}}\right) : K'\left(1 + \frac{2}{\sqrt{d'}}\right),$$

qui exprime que les chaleurs latentes sont entre elles comme les coefficients d'élasticité augmentés d'une quantité qui dépend des poids spécifiques d et d'. Dans le tableau suivant sont rassemblés les résultats obtenus. Le rapport K : K' est la moyenne des rapports des coefficients d'élasticité obtenus par les vibrations longitudinales et par les vibrations transversales, et en employant des métaux successivement étirés, recuits ou coulés, afin de faire disparaître l'influence de l'état physique :

MÉTAUX.	RAPPORT $l : l'$.	RAPPORT K : K'.	RAPPORT K : K' corrigé.
Zinc............. / Étain............	1,97	2,17	2,17
Zinc............. / Plomb	5,23	4,80	5,28
Étain............ / Plomb	2,65	2,20	2,42
Zinc cristallisé..... / Bismuth..........	2,22	2,28	»
Zinc............. / Alliage de Darcel...	3,68	3,67	3,92

La formule se vérifie bien. Pour le zinc et l'étain, le rapport K : K' est le même que ce rapport corrigé ; c'est que les densités de ces métaux sont égales. Pour le zinc et le bismuth, la correction tendrait à altérer l'égalité des rapports, ce qu'on peut attribuer à l'état de cristallisation de ces métaux. On voit que la formule s'applique aussi à l'alliage de Darcet. Comme vérification, M. Person s'est servi de cette formule pour calculer la chaleur latente du cadmium et de l'argent, en prenant le zinc pour terme de comparaison ; en remplaçant l', k' et d', par les valeurs qui correspondent à ce métal, la formule donne $l = 0{,}001669\,\mathrm{K}\left(1 + \frac{2}{\sqrt{d}}\right)$. Il a trouvé ainsi les nombres 13,52 et 20,38, et l'expérience directe donne 13,66 et 21,07. L'accord est donc aussi satisfaisant que possible. Il résulte de là qu'on peut, au moyen de la chaleur latente connue d'un métal, calculer celle d'un autre métal. C'est ainsi que M. Person a trouvé, pour les chaleurs latentes du platine et du fer, 38 et 60 calories, en prenant le zinc pour terme de comparaison. Le fer est le plus résistant des métaux ; il doit donc avoir la plus grande chaleur latente. Le mercure, dont la chaleur latente de fusion est 2,83, doit avoir une résistance encore plus faible que le plomb, dont la chaleur latente est 5,37. Nous voyons ici un second exemple de quantités qui semblent, au premier abord, n'avoir aucune relation, et qui se déterminent les unes par les autres. Ainsi, au moyen du son produit par une verge, on peut calculer la quantité de chaleur qu'elle exige pour se fondre. De même que, de cette dernière quantité, on pourrait conclure le son que rendrait une verge faite avec la même substance.

935. Formule générale de la chaleur latente de liquidité. — Nous voyons qu'il y a entre les métaux et les corps non métalliques une différence essentielle : la chaleur latente des premiers est liée à l'élasticité, et celle des autres à la différence des capacités à l'état liquide et à l'état solide. Pour faire disparaître ce qu'il y a d'étrange dans cette ligne de démarcation, M. Person

observe que la chaleur latente de fusion doit se composer, pour tous les corps, de deux termes, l'un relatif à la différence des capacités sous les deux états, l'autre à la ténacité[1]. Pour les métaux, la différence des capacités est presque nulle; et comme elle entre en facteur dans le terme qui lui correspond, ce terme disparaît, et la chaleur latente des métaux est donnée par la relation

$$l : l' :: K\left(1+\frac{2}{\sqrt{d}}\right) : K'\left(1+\frac{2}{\sqrt{d'}}\right);\quad \text{d'où}\quad l=0{,}001669\,K\left(1+\frac{2}{\sqrt{d}}\right)$$

en remplaçant K', l' et d' par les valeurs qui correspondent au zinc pris pour terme de comparaison. Dans le cas, au contraire, des corps non métalliques, la différence $C-c$ est très marquée, mais la ténacité est très petite relativement à celle des métaux ; de sorte qu'en négligeant le terme qui lui correspond on a, à très peu prés :

$$l : l' = (a+t)\,(C-c) : (a+t')\,(C'-c');\qquad \text{d'où}\qquad l=(160+t)\,(C-c),$$

en prenant pour l', t', $C'-c'$ les valeurs qui correspondent à l'eau.

Une substance pour laquelle la différence $C-c$ serait prononcée, et dont le coefficient d'élasticité serait assez fort, aurait pour chaleur latente

$$[2]\qquad l=(160+t)\,(C-c)+0{,}001669\;K\left(1+\frac{2}{\sqrt{d}}\right).$$

On ne connaît pas de substance dans ce cas, pour laquelle on ait mesuré les valeurs de l, C, c et K. Le brome solide ayant une grande densité, $d=3{,}4$ d'aprés M. I. Pierre, pourrait bien servir à vérifier la formule [2], si l'on connaissait son coefficient d'élasticité. Si l'on adopte pour ce coefficient celui du cristal $K=4000$, on trouve $l=16{,}5$, en prenant, d'après les expériences de M. Regnault, $t=-7°{,}3$ et $C-c=0{,}106-0{,}084$. Or, des expériences directes ont conduit le même physicien à la valeur $l=16{,}2$. L'accord est donc remarquable; mais malheureusement on n'est pas sûr de la valeur de K. — Des expériences trés exactes de M. Alluard[1] ont donné pour la *naphtaline* $C=0{,}4176$ entre 80° et 130°, $c=0{,}3207$ entre 0° et 20°, $l=35{,}6792$; le point de fusion est 79°,91. La première formule de M. Person donne $l=23{,}247$. La différence moins prononcée que dans le cas du brome, pourrait s'expliquer en admettant dans la naphtaline une certaine ténacité.

Pour trouver l'explication de la relation générale [2] qui sert de conclusion à son beau travail, M. Person fait remarquer que le second terme représente le travail nécessaire pour séparer les molécules. Le premier s'applique aux

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XXIV, p. 129; et XXVII, p. 265.

substances chez lesquelles la cohésion agit faiblement ; ces substances peuvent conserver l'état liquide bien au-dessous du point de congélation. Or, si le corps restait liquide, la quantité de chaleur qu'il contiendrait à la température de la congélation serait, en appelant x la distance du zéro absolu, $(x+t)$ C. A la même température et à l'état solide, cette quantité de chaleur serait $(x+t)\,c$; et la chaleur latente de fusion sera la différence entre ces deux quantités, c'est-à-dire $l=(x+t)\,(C-c)$, ou $l=(160+t)\,(C-c)$, en déterminant la constante x au moyen des valeurs correspondantes à une substance quelconque. On peut donc admettre que la chaleur latente de fusion se compose de deux parties, l'une destinée à fournir le travail nécessaire à la séparation des molécules pour produire l'espèce de liquidité que nous présentent les métaux ; sa valeur est sensiblement proportionnelle au coefficient d'élasticité, et elle existe seule dans les métaux. L'autre est employée à donner aux molécules la nouvelle chaleur spécifique qui correspond à l'état liquide ; cette quantité de chaleur paraît proportionnelle au changement de capacité $C-c$, et elle varie avec la température t à laquelle se fait le passage d'un état à l'autre, comme le montre la formule $l=(160+t)\,(C-c)$.

La nouvelle théorie de M. Person séduit par la nouveauté et l'imprévu des conséquences auxquelles elle conduit ; elle montre bien la liaison qui existe entre les phénomènes de la chaleur dans les corps, et leurs propriétés physiques ; mais elle a besoin d'être confirmée par un plus grand nombre d'expériences.

936. Remarques sur les alliages. — En poursuivant les recherches que nous venons de faire connaître, M. Person a remarqué, sur les alliages, différentes particularités curieuses. D'abord il a constaté que *la chaleur spécifique d'un alliage à l'état liquide, est la moyenne entre les capacités des métaux liquides qui le composent* ; la loi est donc la même qu'à l'état solide (932). De plus, ayant mesuré entre 0° et 50° les chaleurs spécifiques de divers alliages solides qui fondent vers 100°, il a trouvé qu'elles satisfont à la loi, ce qui n'a pas lieu, comme nous l'avons vu, quand on se sert des chaleurs spécifiques prises à des températures voisines du point de fusion (932). Ces chaleurs spécifiques sont trop grandes, par suite d'une décomposition qui se fait dans l'alliage quand il approche du point de fusion, et qui est accompagnée d'un dégagement de chaleur. Ce phénomène singulier est surtout prononcé pour l'alliage de Darcet : la marche de son refroidissement est uniforme jusqu'au moment où il se solidifie. Après le dégagement de sa chaleur latente, la température de l'alliage solide baisse régulièrement jusqu'à 57° ; puis tout à coup le thermomètre remonte de 1° ou 2° ; il y a une expansion qui persiste après le refroidissement et qui brise l'ampoule qui contient l'alliage, et le dégagement de chaleur continue encore pendant longtemps. Quand l'alliage est solidifié brusquement dans l'eau, il descend au-dessous de 57° sans que la décomposition se fasse, jusqu'à 36° par exemple ; alors la décomposition commence,

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. LVII, p. 438.

et la température remonte jusqu'à 70°, si bien que l'alliage ne peut plus être manié impunément. M. Warrington a remarqué que la cassure est ensuite terne, au lieu d'être brillante comme auparavant.

§ 2. — PASSAGE A L'ÉTAT GAZEUX, ET LIQUÉFACTION DES GAZ.

I. Phénomènes généraux.

937. Vaporisation des liquides. — Quand on élève la température d'un liquide, sa viscosité diminue, il devient plus fluide, et, arrivé à une certaine température, il entre en *ébullition*, c'est-à-dire qu'il passe à l'état de gaz ou de vapeur, sous forme de bulles qui partent des parois échauffées du vase, montent à travers le liquide et viennent crever à sa surface. Ce phénomène, désigné sous le nom de *vaporisation*, est soumis aux lois suivantes :

1° *La température d'ébullition d'un liquide est toujours la même sous la même pression, et dans un vase de même substance;*

2° *la température du liquide reste constante pendant tout le temps de l'ébullition ;* si l'on fournit une plus grande quantité de chaleur au vase, on ne fait qu'activer la production de la vapeur, mais la température du liquide ne s'élève pas davantage ;

3° *le volume de la vapeur est beaucoup plus grand que celui de la masse de liquide qui l'a fournie ;* par exemple, l'eau donne un volume de vapeur 1700 fois plus grand que le sien.

Voici les points d'ébullition de différentes substances, sous la pression de 760 millimètres :

Acide sulfureux.	—10°	Eau.	100°
Ether sulfurique.	37	Essence de térébenthine . .	157
Carbure de soufre.	47	Phosphore.	290
Brome.	63	Huile de lin.	316
Chloroforme.	63	Acide sulfurique concentré. .	325
Alcool.	79	Mercure.	360
Huile des Hollandais. . . .	85	Soufre.	400
Acide nitrique concentré. . .	86		

On voit que les températures auxquelles les différentes substances se vaporisent, sont très différentes. Les corps très réfractaires peuvent être réduits en vapeur à des températures très élevées. Au moyen de verres ardents ou du chalumeau à hydrogène et oxygène, on fait bouillir l'argent, l'or, le platine. M. Deville a trouvé des globules de platine déposés sous le couvercle d'un

creuset en chaux plein de ce métal en fusion (913), et qui y étaient parvenus à l'état gazeux.

938. Évaporation. — La plupart des liquides peuvent aussi passer à l'état de vapeur spontanément, à des températures très différentes inférieures au point d'ébullition, et seulement par leur surface; on dit qu'ils *s'évaporent.* L'évaporation est d'autant plus rapide que la température est plus rapprochée du point d'ébullition. C'est par évaporation, que l'eau finit par disparaître d'un vase ouvert; que la couche liquide qui mouille les corps disparaît quand ils sèchent.

Hooke, Halley, Leroy, Monge.... pensaient que l'évaporation n'était autre chose que la dissolution du liquide dans l'air. Mais Dalton a prouvé que la vapeur existe par elle-même; car elle se produit dans le vide; et l'air, loin d'être le véhicule de la vapeur, est au contraire un obstacle qui ralentit l'évaporation. Par exemple, Fontana introduisit une même quantité d'alcool dans deux cornues égales A, V (*fig.* 678) terminées par deux boules égales *a*, *v*; l'un des appareils A*a* était rempli d'air, tandis que ce gaz avait été chassé de l'autre en faisant bouillir l'alcool, et fermant la pointe *n* après que tout l'air eût été entraîné par la vapeur. Les deux cornues étant chauffées dans le même bain, la vapeur se forma abondamment dans la cornue V, et vint se condenser en *v*, tandis qu'il n'y eut, au bout du même temps, qu'une très petite quantité de liquide dans la boule *a* qui contenait de l'air.

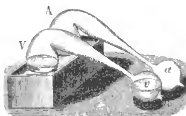


Fig. 678.

Le mercure s'évapore à la température ordinaire, comme l'a prouvé M. Faraday: ayant suspendu horizontalement une lame d'or au bouchon d'un flacon contenant du mercure, il trouva, au bout de six semaines de séjour dans un lieu froid et obscur, la feuille d'or blanchie par le mercure, qui n'avait pu parvenir jusqu'à elle qu'à l'état de vapeur. M. Karsten a fait apparaître, au bout de 24 heures, des images daguerriennes sur une plaque iodée ayant reçu l'action de la lumière, au moyen de vapeurs de mercure dégagées spontanément à une température assez basse pour que l'eau gelât dans la chambre où se faisait l'expérience. Il faut conclure de là que, dans le vide le plus parfait que nous puissions faire, dans le vide du baromètre, il existe encore des traces de matière pondérable, puisqu'il y a de la vapeur de mercure.

Il y a des corps qui ne paraissent pas s'évaporer à la température ordinaire, par exemple l'acide sulfurique concentré. Si l'on met de cet acide sous le récipient de la machine pneumatique, à côté d'une dissolution de baryte, et que l'on fasse le vide, ce qui favorise l'évaporation, comme nous allons le voir, l'eau de

baryte reste limpide, et cependant il suffit de la moindre parcelle d'acide sulfurique pour la troubler. Remarquons que l'acide sulfurique est très visqueux, ce qui montre que la figure de ses molécules exerce une influence marquée sur leur position d'équilibre; il ne constitue donc pas un liquide parfait. Cependant les huiles fixes, qui sont tout aussi visqueuses, donnent des vapeurs sensibles, comme l'atteste l'odeur qu'elles exhalent.

Sublimation. — Il y a des corps qui se subliment, c'est-à-dire qui passent à l'état gazeux sans passer par l'état liquide; par exemple, le camphre, l'arsénic, l'iode; ces corps peuvent se liquéfier sous une pression convenable. La neige peut aussi s'évaporer sans passer par l'état liquide, ce qui explique sa disparition de la surface de la terre, par un froid sec, et sans qu'elle se soit fondue. Boyle a constaté, par exemple, que deux onces de glace, par un très grand froid, avaient perdu dix grains en six heures; de Mairan a vu un bloc de glace perdre $\frac{1}{5}$ de son poids en 24 heures.

939. Chaleur latente d'élasticité. — La constance de la température de l'eau pendant l'ébullition a été remarquée, à peu près à la même époque, par Amontons, Rinaldini et Hooke. Pour expliquer ce phénomène, Black a admis que la chaleur fournie au liquide devient *latente*, en le transformant en fluide élastique. La *chaleur latente* d'élasticité reparaît à l'état de chaleur sensible, quand on fait passer la vapeur à l'état liquide; ce que l'on obtient en la refroidissant ou en la comprimant suffisamment.

Quand le liquide s'évapore spontanément sans qu'on lui fournisse de chaleur, on observe, dans ce liquide et dans les corps en contact, un abaissement de température; ce qui montre qu'il faut de la chaleur latente pour faire passer le liquide à l'état gazeux, par *évaporation* comme par *vaporisation*. Vient-on, par exemple, à plonger la main dans de l'eau tiède, dès qu'on la retire on éprouve une impression de froid produite par l'évaporation. L'alcool, et surtout l'éther, liquides beaucoup plus volatils que l'eau, produisent, comme on sait, une impression de froid assez intense. En agitant l'air, on favorise l'évaporation comme nous le verrons, et la sensation devient encore plus vive. On peut faire geler de l'eau dans un petit matras, en l'enveloppant de coton continuellement mouillé avec de l'éther, dont on favorise l'évaporation par un courant d'air continu. On obtient le même résultat en plongeant le matras dans de l'éther que l'on fait rapidement évaporer sous le récipient de la machine pneumatique. Si l'on projette de l'acide sulfureux liquide sur de l'eau, il se forme immédiatement de la glace. On peut même solidifier le mercure au moyen du même acide condensé, en mettant les deux liquides dans le même vase, autour duquel on fait le vide. Par ce procédé, M. Bussy a pu obtenir un froid de — 68°. Il a pu faire descendre la température jusqu'à — 57° à l'air libre.

940. Congélation de l'eau dans le vide. — Leslie a fait, en 1810, une expérience remarquable, au moyen de laquelle on congèle l'eau par le froid que produit sa propre évaporation. On met sous le récipient de la machine pneumatique (*fig.* 679) une petite capsule peu profonde en argent très mince, contenant

une couche d'eau. Au-dessous de cette capsule est un vase rempli d'acide sulfurique concentré. On fait le vide, l'eau s'évapore et tend à saturer l'espace; mais comme l'acide sulfurique absorbe la vapeur qui se forme, l'évaporation continue et l'eau perd assez de chaleur pour se congeler. Comme il faut enlever 79 calories à 1^{gr} d'eau pour le faire passer à l'état de glace, et que 1^{gr} d'eau, en s'évaporant à 0°, en absorbe 606, comme nous le verrons plus tard, l'évaporation d'un certain poids de ce liquide pourra en congeler un poids environ 7 fois plus grand.



Fig. 680.

Au lieu d'acide sulfurique pour absorber la vapeur, Leslie s'est aussi servi de trapp porphyrique en décomposition, pulvérisé et bien desséché, qui peut absorber plus de $\frac{1}{10}$ de son poids d'eau; ou bien encore de farine d'avoine légèrement torréfiée, qui peut servir à faire congeler en quelques minutes le tiers de son poids d'eau.

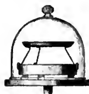


Fig. 679.

Wollaston a imaginé de se débarrasser de la vapeur, en la condensant par le froid. L'eau à congeler est alors placée dans un gros tube en verre *ac* (*fig.* 680), dont on a chassé l'air par l'ébullition avant de fermer l'extrémité *c* à la lampe. On entoure le haut de ce tube, d'un vase *n* dans lequel on met un mélange réfrigérant, de manière que la vapeur se condense dans le haut du tube, en formant une couche de glace. Il se fait alors une évaporation continuelle de l'eau qui se trouve en *a*, et ce liquide ne tarde pas à se congeler. Sous cette forme, l'expérience est moins frappante que celle de Leslie, parce qu'on se sert d'un mélange réfrigérant.

941. Applications. — La congélation de l'eau par son évaporation dans le vide, a été appliquée dans l'industrie à la fabrication en grand de la glace. Au lieu de faire usage de puissantes machines pneumatiques, MM. Taylor et Martineau, en Angleterre, ont imaginé de faire le vide par la condensation de la vapeur. Ils chassent l'air d'un vaste récipient, en y lançant de la vapeur d'eau qu'ils condensent ensuite en refroidissant les parois par un courant d'eau; ils ont ensuite communiquer ce récipient avec le vase dans lequel se trouve l'eau à congeler. La vapeur est absorbée par l'acide sulfurique concentré; et cet acide est concentré de nouveau après avoir servi, au moyen de la chaleur perdue par le foyer de la chaudière qui fournit la vapeur. Le trapp porphyrique, pouvant se dessécher au soleil, présenterait la substance absorbante la plus économique dans les pays chauds.

M. Rizet et M. Carré ont imaginé de fabriquer de la glace au moyen du froid produit par l'évaporation de l'éther dans le vide. L'appareil de M. Rizet consiste en un système de tubes contenant l'éther, et entourés d'eau salée, qui ne se congèle pas, mais sert à refroidir des moules en cuivre contenant l'eau à congeler. Le vide est fait par une machine à vapeur de la force de

10 chevaux. La même machine fait mouvoir une pompe foulante qui comprime la vapeur d'éther dans un réfrigérant enveloppé d'un courant d'eau froide, d'où l'éther retourne ensuite dans les tubes d'évaporation; de sorte qu'il peut servir indéfiniment. L'appareil qui a figuré à l'exposition universelle de Paris pouvait fabriquer 135 kilos de glace par heure, revenant, d'après les inventeurs, à moins de 1 centime le kilogramme.

Alcarazas. — Le froid produit par l'évaporation est utilisé dans certains pays pour rafraîchir l'eau. On emploie pour cela des vases en terre poreuse et demi-cuite, à travers laquelle l'eau peut suinter : on les nomme *alcarazas*. On leur donne ordinairement la forme d'une fiole à médecine, dont l'ouverture serait très évasée et qui aurait 30 centimètres de hauteur. On expose ces alcarazas à un faible courant d'air, et l'évaporation qui se fait continuellement à leur surface extérieure toujours mouillée, peut refroidir l'eau jusqu'à 10° à 12°, quand la température extérieure est à 30°. Les alcarazas sont employés, depuis un temps immémorial, en Egypte, en Perse, dans l'Inde, en Chine. Ils ont été importés en Espagne par les Arabes, et de là ils ont pénétré en France, où l'on commence à en faire usage. Les meilleurs viennent d'Anduxar, dans l'Andalousie. Les fabricants mêlent à l'argile, 5 pour cent de sel, qui, en se dissolvant, laisse une multitude de pores qui rendent l'argile plus perméable. M. Fourmy a, le premier, fabriqué de ces vases en France, sous le nom d'*hydrocérames*. — On refroidit les liquides autres que l'eau, en les mettant dans des vases en métal enveloppés d'un linge continuellement mouillé.

Le froid produit par l'évaporation nous donne l'explication de la fraîcheur qui se répand dans une chambre quand on en mouille le plancher, surtout quand l'air s'y renouvelle continuellement. Au Bengale, on garnit les fenêtres de rameaux mouillés, munis de leurs feuilles; l'air qui s'introduit, se refroidit en passant à travers le feuillage, sur lequel il active l'évaporation. On peut ainsi abaisser la température de 10° et 15° au-dessous de la température ambiante; l'évaporation se faisant très activement, à cause de la grande sécheresse de l'air.

La fraîcheur qui règne dans les bois touffus, pendant les plus grandes chaleurs de l'été, est due à l'évaporation qui se fait à la surface des feuilles et sur le sol ordinairement humide. — Si la température du corps de l'homme s'élève à peine quand il fait très chaud, c'est que la surface de la peau est refroidie par la transpiration insensible, qui se trouve activée par la chaleur, de manière à en neutraliser les effets.

II Formation des vapeurs à la surface.

942. La vapeur se forme spontanément dans le vide. — Pour constater ce phénomène, on prend un tube de baromètre rempli de mercure

purgé d'air et d'humidité par l'ébullition, et renversé sur une cuvette très profonde, et l'on fait passer un peu de liquide, d'alcool par exemple, dans la chambre vide. Pour cela, on remplit une petite éprouvette, de ce liquide; après l'avoir fait bouillir, on la renverse sur le mercure en tenant l'ouverture fermée avec le doigt, puis on la retourne au-dessous du tube barométrique. Ou bien encore, on retire ce dernier après l'avoir incliné pour qu'il soit totalement rempli, on ôte un peu de mercure, que l'on remplace par du liquide bouillant, et, fermant l'ouverture avec le doigt, on redresse le baromètre dans sa cuvette. Dans les deux cas, le liquide monte à travers le mercure, et l'on voit ce métal descendre et s'arrêter presque aussitôt, de manière à ne conserver qu'une partie de sa hauteur primitive. C'est que le liquide a produit de la vapeur, qui s'est répandue dans le vide et ajoute sa pression à la colonne de mercure qui reste, pour faire équilibre à la pression atmosphérique. La force élastique de cette vapeur est égale à la différence *ab* (*fig.* 681) entre la hauteur d'un baromètre *a*B et celle du mercure dans le tube à vapeur V; elle est donc représentée par la quantité *ab* dont la colonne de mercure a été abaissée par la vapeur.

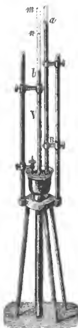


Fig. 681.

Si l'on soulève rapidement le tube à vapeur, de manière à augmenter l'espace qui règne au-dessus du mercure, le niveau de ce dernier reste à la même distance du niveau de la cuvette, pourvu qu'il y ait du liquide en excès. Il faut donc qu'il se soit formé de nouvelle vapeur, qui remplisse le volume *mn* qui a été ajouté, de manière que la tension reste la même. Si l'on vient, au contraire, à enfoncer le tube dans la cuvette, de manière à diminuer l'espace qu'occupe la vapeur, la colonne de mercure conserve encore sa même hauteur, parce que la vapeur qui occupait l'espace qui a été supprimé se liquéfie et perd toute force de ressort, de sorte que la vapeur répandue dans l'espace qui subsiste, conserve sa même tension. De ces expériences, Dalton a conclu les lois suivantes :

1° *Un liquide placé dans le vide fournit de la vapeur qui atteint instantanément une tension maximum.* Si l'on augmente l'espace qu'occupe cette vapeur, il s'en forme d'autre instantanément, pour remplir le nouvel espace, de manière que la masse de vapeur est proportionnelle au volume qu'elle occupe.

2° *La tension maximum ne peut être augmentée par une diminution de volume* ou par la *compression*, celle-ci ayant pour effet de détruire la vapeur qui occupait l'espace supprimé, en la faisant repasser à l'état liquide.

L'espace qui contient ainsi de la vapeur au *maximum de tension* est dit *saturé* de vapeur; il ne serait pas saturé si la quantité de liquide était trop faible pour fournir le volume de vapeur nécessaire à l'état de saturation.

943. Circonstances dont dépend la tension maximum. — La tension maximum d'une vapeur dans le vide dépend : 1° de la nature du liquide. Pour le démontrer, on se sert d'un appareil, nommé *faisceau barométrique* (*fig.* 682), composé de plusieurs tubes de baromètre fixés à deux plateaux circulaires, mobiles autour d'un axe vertical *oo*. Ces tubes contiennent différents liquides, comme de l'eau, *e*, de l'alcool, *a*, de l'éther sulfurique, *s*, de l'essence de térébenthine, *t*, du musc, *m*..... ; ils plongent tous dans une même cuvette, et en faisant tourner l'appareil autour de l'axe *oo*, on les amène successivement en présence d'un baromètre sec B, pour comparer les hauteurs des colonnes de mercure.

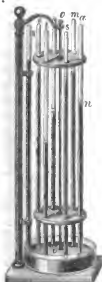


Fig. 682.

2° La tension maximum dépend de la température et augmente rapidement avec elle. Pour le prouver, on se sert de l'appareil de Dalton (*fig.* 683); il se compose de deux baromètres, l'un sec, *b*, l'autre contenant de la vapeur, *v*. Ces deux tubes plongent dans une petite chaudière pleine de mercure; un manchon en verre les enveloppe l'un et l'autre; il contient de l'eau, qui déprime le niveau du mercure dans le manchon, d'une quantité égale à $\frac{1}{14}$ environ de la hauteur de l'eau. On échauffe ce dernier liquide par l'intermédiaire du mercure, et l'on voit que la distance verticale des niveaux *b* et *v* augmente à mesure que la température s'élève.



Fig. 683.

944. Tension des liquides. — Les lois qui précèdent montrent qu'un liquide ne peut subsister qu'autant qu'une pression suffisante, exercée à sa surface, s'oppose à son expansion. Cette pression limite augmente rapidement avec la température : ainsi, à 0°, la tension maximum de la vapeur d'eau est de 4mm,6 de mercure; à 50°, de 91mm; à 100°, de 760mm ou d'une atmosphère; à 150°, de 4,5 atmosphères; et à 200°, de 15 atmosphères. On voit que, pour une température double, la tension est 15 fois plus grande. La tension maximum indique, pour la température à laquelle elle a lieu, la limite de distance des molécules de la vapeur, à partir de laquelle la cohésion agirait pour produire l'état liquide. Au contraire, s'il n'y a pas une pression suffisante de vapeur au-dessus du liquide, il continue à se volatiliser. La tendance à prendre l'état gazeux est d'autant plus prononcée que la température est plus élevée; on la nomme la *tension* du liquide. On conclut de l'existence de cette tension qu'il y a équilibre instable entre les molécules, pour les déplacements qui

tendent à les écarter, et nous avons vu comment on peut rendre compte de cet état particulier d'équilibre (I. 151).

Nous voyons aussi que les fluides élastiques présentent des propriétés spéciales quand ils sont dans le voisinage du point de liquéfaction, et notamment quand ils sont en contact avec un excès de liquide de même substance. C'est dans cette situation particulière que les vapeurs se distinguent réellement des autres fluides élastiques; elles présentent alors des propriétés distinctes dont nous allons poursuivre l'étude.

Si, au contraire, on offre à une vapeur un espace plus grand à occuper, sans qu'il y ait un excès de liquide, sa densité et sa force élastique diminuent, comme chez les gaz proprement dits, en suivant à peu près la loi de Mariotte. Si on l'échauffe, elle se dilate, et son coefficient de dilatation ne diffère de celui des gaz proprement dits, que de quantités comparables à celles dont les coefficients de ces gaz diffèrent entre eux. Si le volume est invariable, la pression augmente et peut se calculer comme on calcule celle des gaz qui s'échauffent. C'est en mesurant les densités des vapeurs à différentes températures et sous différentes pressions, par des moyens que nous indiquerons, que l'on a constaté ces propriétés. Il n'y a donc pas de distinction à faire entre les gaz et les vapeurs quand celles-ci ne sont pas à saturation, d'autant plus que la plupart des gaz ont pu être liquéfiés, comme nous le verrons bientôt.

915. FORMATION DES VAPEURS DANS LES GAZ. — La vapeur se forme encore à la surface d'un liquide quand il est plongé dans un gaz, dans l'air par exemple; et quand l'espace est limité, la vapeur finit par y atteindre une tension maximum, comme dans le vide, et l'on dit alors que le gaz est *saturé* de vapeur; seulement cet état de saturation n'est atteint qu'au bout d'un temps plus ou moins long, tandis que dans le vide il s'établit instantanément.

Nous avons vu qu'un liquide cesse de produire de la vapeur quand celle qui s'est d'abord formée exerce une pression suffisante à sa surface. Or, l'air exerçant une pression bien supérieure à la tension maximum correspondant à la température ordinaire, on doit se demander comment l'évaporation peut cependant avoir lieu dans l'atmosphère. Pour expliquer ce résultat, rappelons-nous que les gaz, à cause de leur force expansive, tendent à se mélanger, même à travers des ouvertures imperceptibles. Or, l'air qui presse sur un liquide, étant poreux, la vapeur se forme dans les points de la surface qui correspondent aux intervalles des molécules de ce gaz, et la vapeur produite se mêle peu à peu à l'air, jusqu'à ce que l'espace soit saturé comme dans le vide. Si l'espace est illimité et l'air en repos, l'évaporation se fera de plus en plus lentement, à mesure que les couches qui reposent sur le liquide approcheront du point de saturation. Si, au contraire, l'air se renouvelle, l'évaporation sera plus rapide, parce que l'air mêlé de vapeur sera remplacé par d'autre qui en contiendra beaucoup moins; ce qui explique pourquoi le vent a la propriété de sécher si rapidement la terre détrempée par la pluie.

Il résulte aussi de là que l'évaporation dans un espace limité rempli de gaz,

ne s'arrêtera qu'au moment où la vapeur aura atteint le même maximum de tension que dans le vide. C'est, en effet, ce que Dalton a constaté.

946. Loi du mélange des gaz et des vapeurs. — *La force élastique de la vapeur qui sature un espace plein de gaz, est la même que dans le vide.* Pour démontrer cette loi, que nous devons encore à Dalton, Gay-Lussac a employé l'appareil (*fig.* 684). Un gros tube *t*, muni de deux robinets en fer *r*, *r'*, communique avec un tube vertical *cn*. Le tube *t* étant rempli de mercure bien sec, on enlève la pièce *sa*, et l'on visse en *r'* le ballon *b* rempli de gaz bien desséché ; puis on ouvre les robinets *r'*, *r*, et celui du ballon. Le mercure s'écoule en *r*, et le gaz pénètre dans le tube *t*. On ferme ensuite les robinets, et l'on observe le niveau du mercure en *t* et *n*. La force élastique du gaz est donnée par la différence des niveaux, augmentée de la hauteur du baromètre. On remplace alors le ballon par la pièce *sa*, qui n'est autre chose qu'un robinet à cuvette (I, 483), et l'on verse du liquide dans l'entonnoir *a* ; faisant ensuite tourner plusieurs fois le robinet *s*, on introduit du liquide goutte à goutte dans le tube *t*. Ce liquide produit de la vapeur, dont la tension s'ajoute à celle du gaz, et le niveau baisse en *t* et monte en *n*. On attend qu'il y ait saturation, ce qui a lieu quand les niveaux ne changent plus de position, et que la surface du mercure en *t* reste mouillée. On verse alors du mercure jusqu'en *n'*, de manière à ramener le niveau *t* à sa position première, et le gaz à son volume primitif. Alors l'excès de la pression actuelle sur celle qui existait avant l'introduction du liquide, représente la tension *h* de la vapeur qui sature le gaz à la température de l'expérience. Si l'on introduit alors de ce même liquide dans la chambre d'un baromètre, on trouve que la dépression produite est égale à *h*, quand la température est la même.



Fig. 684.

On peut se dispenser de ramener le volume du gaz à sa valeur primitive ; mais alors il faut mesurer l'espace qu'il occupe au commencement et à la fin de l'expérience, ce que l'on fait au moyen d'une division en parties d'égale capacité tracée sur le tube *t*. Si P est la pression du gaz sec sous le volume *v*, P' la pression du mélange sous le volume *v'*, la pression du gaz seul sera alors $P\frac{v}{v'}$, et la force élastique de la vapeur, $P' - P\frac{v}{v'}$.

Dans le cas où le liquide, comme par exemple l'éther, dissout les corps gras qui garnissent les robinets, l'air extérieur peut s'introduire dans l'appareil, ou le gaz intérieur s'échapper par les joints. Pour éviter cet inconvénient, Gay-Lussac a modifié son appareil comme on le voit en *t'* (*fig.* 684) ; le robinet supérieur est supprimé, et l'on introduit du gaz dans le tube *t'* par le bas, en le

plaçant sur une cuve à mercure. On verse ensuite de l'éther dans le tube latéral et, faisant écouler du mercure par le robinet inférieur, on fait en sorte que la partie inférieure de la colonne d'éther arrive à la jonction des deux tubes, de manière qu'une partie de ce liquide pénètre en *t'*. On verse ensuite du mercure dans le tube latéral, et l'on achève l'expérience comme il a été dit ci-dessus.

947. Expériences à différentes températures. — L'appareil de Gay-Lussac ne peut pas donner une bien grande précision, et d'ailleurs il ne permet pas d'opérer à des températures variées. M. Regnault, dans ses études sur l'hygrométrie, a employé une méthode plus exacte, et avec laquelle il a pu opérer à des températures comprises entre 0° et 38° [1]. Son appareil est construit comme un thermomètre à air, semblable à ceux de la *fig.* 645 (p. 225), seulement on a soin d'introduire dans le ballon une petite ampoule de verre pleine d'eau et fermée à la lampe, et les parties supérieures des deux branches du manomètre sont plongées dans le bain, et disposées comme les tubes *t*, *t'* de la *fig.* 707. Après avoir rempli le ballon d'air sec, par le tube *p* (*fig.* 645), et avoir amené le mercure au repère α dans le tube *bn*, pendant que le ballon est entouré de glace et que l'intérieur est soumis à la pression atmosphérique, on ferme à la lampe le tube *p*. On entoure ensuite le ballon d'eau que l'on porte successivement à différentes températures, on ramène à chaque température le niveau au repère α, afin que le volume du gaz soit toujours le même, et l'on mesure la pression. On enlève ensuite l'eau du bain, on approche quelques charbons du fond du ballon, et le liquide qui remplit l'ampoule se dilate et la fait éclater. On recommence alors la série des observations qu'on a faites sur l'air sec, en ayant soin d'attendre que la pression soit bien stationnaire à chaque température. L'excès de la pression sur celle qu'on a obtenue dans la première série à la même température, donne alors la tension de la vapeur à saturation. Pour plus de sécurité, M. Regnault a opéré d'abord en élevant successivement la température, et ensuite en l'abaissant de manière que la vapeur se condensât en partie, d'une observation à la suivante. Des expériences faites dans l'air et dans l'azote ont constamment donné, pour la tension de la vapeur d'eau dans le gaz, une valeur un peu plus faible que la tension dans le vide. La différence n'est que de quelques dixièmes de millimètres ; elle est irrégulière, ne paraît pas liée à la température, et varie d'une manière différente dans l'air et dans l'azote. Si elle n'est pas due à quelque cause d'erreur constante restée inaperçue, on pourrait l'expliquer comme on explique le décroissement de la quantité d'air que l'on enlève d'un récipient où l'on fait le vide. Ici, l'inertie des molécules du gaz et de la vapeur arrêterait l'évaporation avant que la saturation ne soit complète, lorsque l'excès de la tension du liquide sur celle de la vapeur déjà formée serait devenue extrêmement faible.

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XV, p. 129.

Dans tous les cas, la différence étant très petite, on peut admettre, dans les applications et les calculs, que la force élastique de la vapeur d'eau à saturation, est la même à température égale, dans le vide et dans un gaz. Ce résultat est vrai encore quand il y a plusieurs vapeurs mélangées provenant de différents liquides et n'ayant pas d'actions chimiques les unes sur les autres : chacune se comporte comme si elle était seule. Ajoutons que la force élastique primitive du gaz n'a aucune influence sur les résultats.

L'eau n'ayant qu'une faible tension dans les basses températures, M. Regnault a expérimenté avec l'*éther*, le *sulfure de carbone* et la *benzine*, substances beaucoup plus volatiles [1]. Il a trouvé constamment la tension de la vapeur plus faible que dans le vide ; les différences sont d'autant plus prononcées que le liquide est plus volatil ; ainsi vers 13° les différences sont 5^{mm}, 2^{mm} et $1^{mm},4$ pour l'éther, le sulfure de carbone et la benzine. Elles augmentent avec la pression et avec la température.

La tension dans les gaz se rapproche davantage de celle qui a lieu dans le vide quand on refroidit brusquement le ballon pour amener une condensation abondante de vapeur, puis qu'on rétablit rapidement la température stationnaire. Si alors on observe la pression de quart d'heure en quart d'heure, on la voit diminuer lentement pendant plusieurs heures. Si, au contraire, on opère en échauffant le bain jusqu'à la température stationnaire, une fois celle-ci atteinte la tension augmente lentement sans cependant jamais atteindre celle qui aurait lieu dans le vide à la même température. — Voici comment M. Regnault explique ces résultats : la vapeur est condensée par la surface du vase, en vertu de son affinité pour le liquide, de manière qu'il n'y a pas saturation. Le liquide condensé descendant par son poids, l'affinité hygroscopique de la surface n'est pas satisfaite, et de nouvelles vapeurs se condensent. Dans le vide, la vapeur condensée est immédiatement remplacée, mais dans un gaz elle se forme trop lentement pour qu'il en soit ainsi. Après un refroidissement, la vapeur condensée ne s'écoulant sur les parois que lentement, on voit pourquoi la tension diffère moins de celle qui a lieu dans le vide, et pourquoi elle va ensuite en diminuant.

M. Regnault conclut de ses expériences que la loi de Dalton sur le mélange des gaz et des vapeurs est exacte en principe, et que si l'expérience ne la vérifie pas exactement, cela tient à l'influence des parois des vases dans lesquels on opère. D'autres expériences faites dans le gaz hydrogène et dans l'acide carbonique, au moyen d'un eudiomètre particulier, l'ont conduit à la même conclusion.

948. Précipitation de la vapeur. — La quantité de vapeur nécessaire pour saturer un espace vide ou plein de gaz est d'autant plus petite que la température est plus basse. Il en résulte que si l'on vient à refroidir un espace saturé, une partie de la vapeur se précipitera à l'état liquide. Il n'est même pas

[1] *Comptes-rendus de l'Académie des sciences de Paris*, t. XXXIX. p. 345.

nécessaire que l'espace soit saturé, si on le refroidit assez pour qu'il le devienne avec la quantité de vapeur qu'il contient. C'est ainsi que l'air humide, refroidi au contact des corps très froids, laisse déposer des gouttelettes d'eau à leur surface. Si le refroidissement se fait dans toute la masse gazeuse, comme cela a lieu lorsqu'on la dilate brusquement, la précipitation a lieu dans tous les points de cette masse. Pour faire l'expérience, il suffit de raréfier rapidement de l'air humide contenu dans un récipient; on voit alors apparaître une espèce de brouillard formé de gouttelettes d'eau très fines, qui restent en suspension dans l'air, à cause de leur faible poids, comme cela arrive pour les poussières fines. Ce brouillard disparaît en peu d'instants, chaque gouttelette s'évaporant dans le gaz, qui a bientôt repris la température ambiante. De même, la vapeur pure ou mêlée d'air, chassée dans un espace plus froid, forme un brouillard, parce qu'il y en a plus qu'il n'est nécessaire pour saturer l'espace où elle arrive. Si cet espace est indéfini et non saturé d'avance, les gouttelettes disparaissent bientôt en s'évaporant dans les portions d'air plus éloignées. C'est ce qui a lieu, par exemple, quand, par un temps froid ou humide, on distingue son haleine. Les légers nuages qui s'exhalent de l'eau chaude sont dûs à la même cause; ils se dissipent presque aussitôt en s'évaporant dans des couches d'air plus élevées. Il faut remarquer que ces nuages, que l'on désigne improprement sous le nom de vapeur, sont composés de gouttelettes d'eau; la vapeur proprement dite est transparente comme l'air, et elle n'est visible que lorsqu'elle est colorée, comme la vapeur d'acide hypoazotique, la vapeur d'iode.

949. Tension maximum dans une enceinte à température inégale. — Considérons une enceinte vide, de forme quelconque et contenant un liquide qui ne soit pas dans l'endroit le plus froid. Ce liquide fournira de la vapeur avec la tension maximum qui correspond à sa température, et cette vapeur, se répandant dans tout l'espace, tendra à y établir partout la même pression. Or, cette pression est trop grande pour la température de la partie la plus froide; une portion de la vapeur se condensera donc en ce point de l'enceinte. Mais alors la tension dans tout l'espace étant diminuée, il n'y aura pas saturation près du liquide; de nouvelles vapeurs se produiront donc, puis une nouvelle condensation se fera dans la partie froide, et ainsi de suite jusqu'à ce que tout le liquide s'y soit ainsi transporté par *distillation*. Alors la pression dans l'enceinte sera partout égale à la tension maximum qui correspond à sa température la plus basse.

Si l'enceinte contient du gaz, cet état final s'établira de la même manière, seulement au bout d'un temps beaucoup plus long. L'appareil de Fontana (*fig.* 678) peut servir à montrer le passage du liquide dans la partie la plus froide d'une enceinte vide ou remplie d'air.

950. Problèmes sur les vapeurs. — La loi du mélange des gaz et des vapeurs permet de résoudre divers problèmes importants:

1° Etant donné le volume V d'un gaz sec, trouver son volume V′ quand il est saturé de vapeur à la même température *t* et sous la même pression P.

Si nous appelons F la force élastique de la vapeur à saturation à la température t, la pression du gaz seul dans le mélange dont la pression est P, sera $P-F$; alors on aura, d'après la loi de Mariotte, $V' : V = P : (P-F)$.

2° Etant donné un volume V de gaz saturé à la température t et sous la pression P, trouver son volume V', aussi saturé, à la température t' et sous la pression P'. Soit F et F' les tensions de la vapeur aux températures t et t'. Les pressions dues au gaz seul, à ces deux températures, seront $P-F$ et $P'-F'$. Alors, d'après la loi de Mariotte et celle des dilatations, on aura

$$[1] \qquad \frac{V'}{V} = \frac{P-F}{P'-F'} \cdot \frac{273+t'}{273+t}.$$

Si le gaz n'est pas en contact avec un excès de liquide, et si l'on a $t' > t$, il pourra se faire que l'espace ne soit plus saturé, et alors la formule ne pourra pas s'appliquer. Pour savoir quand cela aura lieu, soient D et D' les densités de la vapeur à saturation aux températures t et t', sous les pressions F et F'. En appliquant à la vapeur, les formules des dilatations des gaz et la loi de Mariotte [1], on aura

$$[2] \qquad \frac{D'}{D} = \frac{F'}{F} \cdot \frac{273+t}{273+t'}; \qquad \text{d'où} \qquad \frac{V'D'}{VD} = \frac{PF'-FF'}{P'F-FF'}, \qquad [3]$$

en multipliant l'équation [2] terme à terme par la précédente [1]. La formule [3] donne le rapport des masses de vapeur qui saturent les volumes V et V' aux températures t et t'. Pour que la masse de vapeur VD soit assez grande pour saturer le volume V' à la température t', il faut que PF' soit plus petit que P'F; car alors V'D' sera moindre que VD, et un excès de vapeur se condensera; alors la formule [1] sera applicable. Il en sera de même si l'on a $PF' = P'F$; mais il n'y aura pas de précipitation. Enfin, si PF' est plus grand que P'F, on aura $VD < V'D'$, et le volume V' à la température t' n'étant pas saturé, la formule [1] ne sera plus applicable.


Fig. 685.

Manomètre de Berthollet. — Comme application, supposons qu'on veuille savoir s'il y a eu absorption ou dégagement de gaz dans un vase fermé contenant de l'eau et diverses substances organiques, et muni d'un thermomètre et d'un manomètre (*fig.* 685). Soient P et t la pression et la température au commencement de l'expérience, X et t' leurs valeurs à la fin, et F et F' les tensions de la vapeur à saturation, aux températures t et t'. S'il n'y a eu ni dégagement ni absorption de gaz, la pression, après l'expérience, sera,

[1] Cette loi ne s'applique pas rigoureusement dans le voisinage du point de liquéfaction, pas plus que la formule des dilatations, d'après ce que nous avons vu (870). Ce calcul n'est donc qu'une approximation.

d'après la formule [1], $P' = (P - F)\frac{273 + t'}{273 + t} + F'$, car on a $V = V'$, en négligeant la dilatation du vase. Si X est plus grand que P', c'est qu'il y a eu dégagement de gaz, et s'il est moindre, il y a eu absorption. L'appareil se nomme *manomètre de Berthollet* (*fig.* 685).

III. De l'ébullition.

951. Quand on échauffe un liquide dans un vase ouvert, il se produit d'abord à sa surface, une évaporation qui va en augmentant avec la température. Bientôt les couches en contact avec les parois chauffées sont assez chaudes pour que la vapeur qu'elles tendent à produire soit capable de vaincre le poids de l'eau supérieure et la pression de l'atmosphère. On voit alors des bulles de vapeur se détacher des parois du vase, monter à travers le liquide en diminuant de volume, puis se condenser et disparaître, en arrivant dans les couches supérieures qui sont moins chaudes. Les mouvements de ces bulles et



Fig. 686.



Fig. 687.

leur succession rapide produisent des apparences de cônes irréguliers, faciles à distinguer dans un vase de verre A (*fig.* 686). Le liquide, en se précipitant dans l'espace abandonné par chaque bulle qui se condense, produit une petite secousse, d'où résulte ce bruissement particulier qui précède l'ébullition, et que l'on indique en disant que l'eau *chante* avant de bouillir. La chaleur latente abandonnée par les bulles qui se sont condensées, et l'agitation produite par leur ascension, font que la température est bientôt aussi élevée dans les couches supérieures que dans les couches inférieures; alors les bulles de vapeur arrivent jusqu'au niveau, en augmentant de volume à cause de l'évaporation qui se fait par toute leur surface intérieure, et à cause de la diminution de la pression du liquide à mesure qu'elles s'élèvent. Elles présentent alors l'apparence de troncs de cônes irréguliers dont la plus petite base est en bas, B (*fig.* 686). L'ébullition est alors en pleine activité.

Eolipyle. — Le phénomène de l'ébullition était expliqué autrefois d'une manière tout à fait erronée; on confondait alors tous les gaz sous le nom d'air

et, en partant de cette idée fausse, la vaporisation était regardée comme la transformation de l'eau en air. Vitruve partageait cette opinion, qui persista jusque dans le XVIIe siècle. Un petit instrument, nommé *éolipyle*, servait à montrer cette prétendue transformation ; il consiste en un vase en métal terminé par un tube très étroit (*fig.* 687) ; on y introduit de l'eau, en chassant d'abord une partie de l'air par la chaleur, et plongeant ensuite l'orifice *o* dans l'eau, pendant le refroidissement. Si l'on met ensuite le vase sur le feu, la vapeur s'échappe en *o* avec plus ou moins de force. Vitruve dit que cette expérience sert à expliquer la nature de l'air et des vents. Héron d'Alexandrie connaissait l'éolipyle, mais ne le désignait pas par ce nom ; il semble avoir eu des idées plus exactes que ses successeurs sur la nature de la vapeur qui s'échappe de ces petits instruments, et il connaissait la manière de les remplir.

La température de l'ébullition dépend : 1° de la nature du liquide ; 2° de la pression extérieure ; 3° de la surface intérieure du vase ; 4° des substances dissoutes dans le liquide.

952. EFFETS DE LA PRESSION. — Dalton a reconnu par l'expérience que *la force élastique de la vapeur pendant l'ébullition est égale à la pression extérieure*. Ce résultat est facile à concevoir ; car la vapeur, pour subsister sous forme de bulles dans le liquide, doit pouvoir résister à la pression à laquelle elle est soumise. Cette loi, connue sous le nom de *loi de Dalton*, a été prouvée au moyen de l'appareil (*fig.* 683) : quand l'eau du manchon est à la température d'ébullition dans un vase ouvert du liquide contenu dans le tube, le niveau du mercure dans ce tube descend au niveau de la cuvette. Cette égalité entre la tension de la vapeur et la pression extérieure sert de caractère et de définition au phénomène de l'ébullition ; elle explique pourquoi un siphon, une pompe aspirante ne peuvent fonctionner avec de l'eau bouillante, dont les vapeurs remplacent la pression atmosphérique, ni avec de l'eau chaude quand la pression produite par les colonnes soulevées dépasse l'excès de la pression atmosphérique, sur la tension de la vapeur à cette température.

Il résulte aussi de là, que la température de l'eau pure ne peut être portée au-delà de 100°, à l'air libre sous la pression de 760^{mm} ; si l'on fournit plus de chaleur, il se forme une plus grande quantité de vapeur dans le même temps, mais la température ne s'élève pas, à cause de la chaleur latente enlevée. Si l'on veut échauffer de l'eau au-dessus de 100°, il faut exercer une grande pression sur sa surface. C'est ce que l'on peut faire au moyen de la vapeur elle-même.

Marmite de Papin. — Cet appareil, nommé aussi *digesteur de Papin*, consiste en un vase très résistant R (*fig.* 648), fermé par un couvercle fortement maintenu, au moyen d'une vis *vv* qui prend son écrou dans un arc métallique très fort fixé au vase par des clavettes *c*, *c*. Des bandes de carton mouillé sont interposées entre le bord du vase et le couvercle. Un levier L, chargé par un poids P, presse sur un rond de carton qui ferme un ajutage *o*

adapté au couvercle. On met de l'eau dans le vase R, et on le porte sur le feu; la vapeur, qui n'a pas d'issue, s'accumule au-dessus du liquide, y exerce une pression croissante, de manière que l'ébullition est empêchée et que la température s'élève de plus en plus. Le levier L, qui ferme l'orifice *o*, est destiné à limiter la tension de la vapeur, qui finirait par faire éclater l'appareil avec violence, si elle devenait trop forte. Quand cette vapeur atteint une certaine limite, elle soulève le levier en *o*, et s'échappe au-dehors. Cette disposition constitue la *soupape de sûreté*, si fréquemment employée dans les chaudières à vapeur, et l'une des plus utiles inventions de Papin.

La température que l'on peut donner à l'eau dans la marmite de Papin est assez élevée pour que Musschenbroeck ait pu y fondre de l'étain et du plomb. La force dissolvante de cette eau est considérablement augmentée; les os s'y ramollissent, la gélatine qu'ils contiennent est dissoute, et l'on tire parti de ces effets pour préparer du bouillon de gélatine, avec des os. On a pu même extraire ainsi de la gélatine d'os fossiles, et il y a une trentaine d'années qu'on a servi sur la table du préfet du Nord, de la gélatine extraite d'os de mastodontes et d'autres grands mammifères fossiles, c'est-à-dire d'animaux morts depuis plus de 6000 ans.

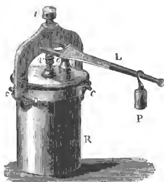


Fig. 688.

Le bois soumis à l'action de l'eau surchauffée dans le digesteur de Papin, prend l'aspect du bois décomposé par une longue exposition à l'air et à la pluie; l'eau en a extrait les matières résineuses, les huiles, les gommes.

La description de la marmite de Papin a été publiée en Angleterre en 1681, sous le titre de *Nouveau digesteur*; l'ouvrage fut traduit en français sous ce titre: *Manière d'amollir les os*, etc. Papin destinait particulièrement son appareil à la cuisson, dans un temps très court, des légumes et de la viande. Depuis, on a fait usage pendant quelque temps, dans les ménages, d'appareils analogues nommés *marmites autoclaves*, et dont l'ouverture se ferme par un procédé dont est tiré leur nom. L'ouverture a une forme ovale, ainsi que le couvercle. Ce dernier, un peu plus grand, s'introduit en le présentant par son petit diamètre; on le retourne ensuite et on l'applique contre le bord de l'orifice, de dedans en dehors. La pression de la vapeur le maintient alors d'autant plus fortement qu'elle a une plus grande tension. Malgré l'adjonction d'une soupape de sûreté, ces appareils, entre des mains inexpérimentées, ont occasionné des accidents qui les ont fait généralement abandonner.

953. Ébullition sous de faibles pressions. — Si, au lieu d'augmenter la pression au-dessus du liquide, on la diminue, l'ébullition devra se faire à une

température plus basse que 100°; c'est, en effet, ce qui a lieu : on met sous le récipient de la machine pneumatique, un vase rempli d'eau à une température t inférieure à 100° (*fig.* 689), on raréfie l'air, et dès que sa force élastique est devenue égale à la tension que possède la vapeur à $t°$, l'ébullition se produit. Elle cesse un instant après, à cause du refroidissement qui résulte de l'absorption de la chaleur latente par la vapeur qui s'est formée. Pour la faire recommencer, il suffit de raréfier encore un peu l'air. On remarque que les bulles de vapeurs prennent naissance dans les parties supérieures du liquide; c'est là, en effet, que la pression est la plus faible. Dans le vide parfait, l'ébullition devrait se faire à une température très basse et seulement à la surface, ce qui est d'accord avec les lois de la formation des vapeurs dans le vide.



Fig. 689.

On peut encore faire l'expérience suivante : on fait bouillir de l'eau dans un ballon pendant un temps assez long pour que tout l'air soit entraîné par la vapeur; on bouche alors hermétiquement le ballon et on le renverse (*fig.* 690). Si l'on vient, au bout de quelque temps, à verser de l'eau froide sur sa surface, on voit l'ébullition se produire tumultueusement; la vapeur qui remplit le ballon se condensant par le contact des parois refroidies, d'où résulte une diminution de pression. Deux heures après, on peut encore produire ce phénomène.

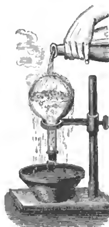


Fig. 690.

Sur une haute montagne, l'ébullition de l'eau a lieu à une température plus basse que dans la plaine. Ce fait, remarqué pour la première fois par Amontons, s'explique facilement, puisque la pression diminue à mesure qu'on s'élève dans l'atmosphère. Fahrenheit, Graffl avaient observé, de leur côté, que la température d'ébullition baisse quand le baromètre descend. Cassini a vu l'eau bouillir au-dessous de 100°, sur la montagne du Canigou, et Montesquieu a fait une observation semblable sur le pic du Midi. Enfin, Mariotte annonça que l'eau tiède bouillirait sur une montagne d'une lieue et demie de hauteur.

954. Thermomètre barométrique. — L'égalité entre la pression extérieure et la tension de la vapeur pendant l'ébullition, a fait songer à déduire la première de la seconde supposée connue; par exemple, d'évaluer la pression sur une montagne au moyen de la température de l'ébullition de l'eau, pour calculer ensuite sa hauteur en partant de cette pression, au moyen des formules connues (I, 398). Fahrenheit et Cavallo ont, les premiers, indiqué cette méthode; mais il faut des précautions particuliéres pour qu'elle puisse donner

une précision comparable à celle du baromètre. En effet, le baromètre baisse de 1^{mm}, au niveau de la mer, quand on s'élève de 10^{m} environ. Dans les mêmes circonstances, le degré d'ébullition de l'eau ne varie que de $\frac{1}{27}$ de degré ; il faut donc que les degrés du thermomètre occupent une longueur de 27^{mm} pour que la quantité à mesurer soit de même grandeur que celle qu'on observe sur le baromètre. John Wollaston a fait construire, pour cet usage, des thermomètres dont les degrés avaient 5^{cm} de longueur. On conçoit que l'instrument serait d'une longueur incommode si l'on ne se contentait de la portion de l'échelle, voisine de 100°. J. Wollaston ne conserve que 3°, et pour expérimenter sous différentes pressions, comme il suffit d'avoir la différence de température d'ébullition aux deux stations, il applique le principe du thermomètre métastatique (706), en ajoutant à la colonne thermométrique, et en quantité d'autant plus grande que la température d'ébullition doit être plus basse, une partie du mercure tenu en réserve dans un renflement ménagé à l'extrémité du tube. L'instrument se règle dans l'eau bouillante, à la station inférieure. — Les thermomè[illegible] réservoir intermédiaire, portant les deux points fixes (70[illegible] souvent préférés, à cause de la facilité de vérifier le [illegible] peu de longueur qu'on peut aussi leur donner.



Fig. 691.

Ainsi perfectionnée, la méthode ther[illegible]e est beaucoup plus commode dans les voy[illegible]tion directe du baromètre, l'appareil qu'elle [illegible] volumineux, moins pesant et moins fragil[illegible]

Hypsomètre. — M. Regnault a [illegible] areil très portatif, destiné à ces sortes [illegible] siste en une petite chaudière en cuivre [illegible]e par un cylindre en laiton *oo'*, qui so[illegible] ool *l*, destinée à porter à l'ébullition l'e[illegible] chaudière; des tubes *t*, *t*, *t*, vissés en [illegible]es uns dans les autres, comme les tuyau[illegible]tiennent le thermomètre. La vapeur s'échappe par une ouverture latérale ménagée dans le tube supérieur, et l'air nécessaire à la combustion de la lampe s'introduit par les ouvertures *o*, et sort en *o'*. Un écran cylindrique *c*, présentant diverses échancrures, sert à fermer celles de ces ouvertures qui sont du côté du vent. Cet instrument, avec les tubes rentrés, n'a que 15^{cm} de hauteur. Pour l'usage de cet appareil, M. Regnault a construit, par les méthodes que nous indiquerons plus tard, des tables donnant les tensions de la vapeur d'eau pour chaque dixième de degré, entre 85° et 101°.

Quand on a obtenu la pression de l'air au moyen de l'hypsomètre, on calcule l'*altitude* du lieu en se servant de la formule de Laplace (I, 398). Pour simplifier, on a cherché une relation directe entre l'altitude et la température

d'ébullition. M. Forbes [1], à la suite de nombreuses comparaisons de températures d'ébullition à des hauteurs calculées au moyen du baromètre, a reconnu que la différence h de niveau de deux stations, est sensiblement proportionnelle à la différence t des températures d'ébullition à ces deux stations; de sorte que l'on a $h = mt$. M Soret a cherché jusqu'à quel point cette formule donne des résultats d'accord avec ceux de la formule de Laplace, pour des valeurs correspondantes de la pression et de la température d'ébullition données par les tables de M. Regnault. En mettant à la place de h et de t des valeurs connues, il a d'abord trouvé qu'il faut faire m égal à 294 mètres. Il a reconnu ensuite que, lorsque les températures sont comprises entre 100° et 90°, l'erreur peut aller à 24 mètres dans le cas le plus défavorable; elle peut n'être que de 1 mètre. La formule $h = 295^m . t$ pourra donc être employée quand on ne tiendra pas à une très grande exactitude.

255. INFLUENCE DE LA NATURE DU VASE. — Gay-Lussac a reconnu que l'eau bou[illegible] à une température plus élevée, quelquefois de 1°, dans un vase de verre que [illegible]ns un vase de métal. La différence dépend de la nature du verre et même de [illegible]at de sa surface; Gay-Lussac l'attribue à l'adhérence des molécules liqu[illegible] au verre, adhérence qui les empêche de quitter sa surface pour prendre l'éta[illegible]zeux. C'est pourquoi l'ébullition se fait péniblement dans un vase de ver[illegible] entend un bruit assez prononcé, les bulles sont grosses, peu nombre[illegible] ne partent que d'un petit nombre de points; en même temps, la tem[illegible] éprouve des oscillations assez prononcées, à cause de la chaleur late[illegible] par les grosses bulles qui se détachent. Dans un vase de métal, les b[illegible] petites et plus nombreuses, elles partent d'un grand nombre de po[illegible]omètre n'éprouve plus de fluctuations sensibles, et la température [illegible]t moins élevée que dans un vase de verre. Pour s'en assure[illegible]ter dans de l'eau dont l'ébullition vient de s'arrêter dans le vase [illegible]u de limaille métallique; l'ébullition reprend aussitôt, mais el[illegible]nt après, à cause de l'abaissement de température résulta[illegible]mportée à l'état latent par la vapeur qui s'est formée. Du verr[illegible]it un effet semblable, mais moins prononcé; ce qui montre [illegible]e de l'adhérence de l'eau aux parois vitreuses.

Cette adhérence est bien plus prononcée avec l'acide sulfurique. Il en résulte que la température de ce liquide s'élève au-dessus du point d'ébullition, puis une bulle se détache, grossit énormément, à cause de la chaleur qu'elle trouve accumulée, et vient crever à la surface, en soulevant la masse liquide qui, en retombant, imprime une secousse qui peut briser le vase. Ces *soubresauts* sont surtout à redouter dans les fabriques d'acide sulfurique, où l'on concentre ce liquide dans de grandes cornues en verre. On peut les éviter en mettant au fond des cornues, suivant le précepte de Gay-Lussac, de petits fragments de fil de platine, sur lesquels les bulles de vapeur prennent naissance avec régularité.

[1] *Bibliothèque universelle de Genève* (archives des sciences, 1855), t. XXX, p. 290.

On évite encore les soubresauts en chauffant les cornues par le contour, au lieu de les chauffer par le fond.

Expériences de M. Marcet. — En réfléchissant à l'explication de Gay-Lussac, M. Marcet de Genève[1] pensa que la limaille en petite quantité ne devait pas ramener l'ébullition à 100° dans le verre, à cause de l'adhérence sur les parties non couvertes de limaille; aussi a-t-il toujours vu la température se maintenir au moins à 100°,2. Avec de la limaille très fine, la température descend à 100° et quelques centièmes. M. Marcet admet une influence des pointes que présentent les parcelles de limaille; chaque pointe devenant un centre d'où partent des bulles nombreuses.

Influence de l'état de la surface. — Si le vase est enduit d'une substance pour laquelle la cohésion de l'eau soit moins prononcée que pour le métal, le point d'ébullition est abaissé au-dessous de 100°; c'est ce qui arrive avec un ballon de verre, dans lequel l'eau bout à 99°7, quand on l'enduit d'une couche mince de soufre. Si l'on recouvre d'une couche de gomme laque l'intérieur d'un vase métallique, l'ébullition s'y fait à 99°,8. Dans des vases de verre en apparence identiques, il peut y avoir une différence de 0°,85 dans la température d'ébullition de l'eau. A 100°,4, il n'y a pas de soubresauts, tandis qu'à 101°,25 il s'en produit, et la température oscille de 0°,1 à 0°,25, et d'autant plus que les soubresauts sont plus violents.

Quand on a laissé séjourner de l'acide sulfurique dans un ballon neuf dans lequel l'eau bout à 101°, la température de l'ébullition de l'eau s'élève à 105°, et même à 106°, après qu'on a lavé le ballon avec l'attention la plus scrupuleuse. Les bulles de vapeur ne partent que de quelques points, et à chaque bouffée le thermomètre descend de quelques dixièmes de degré, pour remonter aussitôt. Dans les expériences de M. Marcet, le ballon était chauffé dans un bain d'huile; une parcelle de limaille de fer rendait l'ébullition régulière, et la température redescendait à 100°. La potasse caustique exerce la même influence que l'acide sulfurique, mais à un degré moindre. L'alcool donne des résultats semblables à ceux de l'eau.

M. Marcet explique ces phénomènes par l'existence dans les ballons neufs de poussières adhérentes favorisant l'ébullition; l'acide sulfurique et la potasse détruiraient ces poussières. Les ballons en verre vert en sont tellement recouverts que l'ébullition s'y fait presque aussi facilement que dans un vase métallique; mais vient-on à les détruire, soit en frottant l'intérieur avec du papier mouillé, soit en portant le ballon à la chaleur rouge, l'ébullition ne se fait plus que de 103 à 105 degrés.

956. Phénomènes produits dans les vases chauds. — Quand on projette de l'eau goutte à goutte dans un creuset de métal incandescent, ce liquide s'arrondit sur son contour, comme une goutte de mercure sur du verre, reste transparent sans aucune apparence d'ébullition, et s'évapore lentement pour ne disparaître

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. V, p. 449.

qu'après un temps assez long. L'expérience se fait dans des capsules de platine, argent, fer, porcelaine, verre; tantôt le globule liquide est en repos, tantôt il tourne rapidement sur lui-même. De l'eau sur le cuivre en fusion, sur la loupe de fer, s'arrondit de même et n'éprouve pas d'ébullition. Il y a évidemment absence de contact entre le liquide et la surface incandescente ; car, si l'on prépare, comme l'a fait M. Boutigny, un globule d'eau rendue opaque par du noir de fumée, sur une plaque horizontale d'argent portée au rouge, on peut apercevoir la flamme d'une bougie entre la surface inférieure du globule et la plaque. MM. Warkmann, Poggendorff... ont aussi reconnu qu'un *courant électrique* ne peut passer du globule dans le vase métallique, ce qui suffit pour prouver qu'il y a séparation. Si l'on vient à laisser refroidir la surface, il arrive un moment où le contact se rétablit, et l'ébullition se produit aussitôt avec violence.

Eller paraît avoir le premier observé ces phénomènes curieux, vers 1746. Dix ans après, Leidenfrost en fit une étude attentive; ce qui fait qu'on désigne l'expérience sous le nom d'*expérience de Leidenfrost*. Deslandes, à Saint-Gobain, vit 2 décilitres d'eau rester sur le verre en fusion, sous forme arrondie, et ne s'évaporer qu'avec lenteur ; d'où il avait conclu que l'air était nécessaire à la vaporisation, et qu'il prêtait, pour ainsi dire, des ailes à la vapeur. Les verriers tirent parti de cette propriété pour façonner le verre ; ils portent la masse ramollie et incandescente qu'ils tiennent au bout d'un tube de fer, dans une auge en bois remplie d'eau, où ils l'arrondissent en la faisant tourner sur le fond. L'eau ne mouille pas le verre, et il n'y a pas de vaporisation violente, comme on aurait pu le croire d'abord. Après avoir soufflé dans la masse pour y produire une petite cavité, ils y lancent un peu d'eau, et bouchent le tube avec le pouce ; l'eau s'évapore alors modérément, et la vapeur fait distendre les parois.

Klaproth, puis Rumfort, ont aussi étudié ce phénomène. Ce dernier a reconnu qu'il pouvait avoir lieu à une température beaucoup plus basse qu'on ne l'avait cru jusqu'alors : il mit une goutte d'eau dans une cuiller recouverte de noir de fumée, et la vit prendre la forme globulaire à la température ordinaire. Ayant échauffé la cuiller jusqu'à ce que la queue fût devenue brûlante, il reconnut que la température de l'eau s'était à peine élevée.

M. Baudrimont a cherché à évaluer la température de l'eau contenue dans un creuset de platine incandescent[1]. Il employait la méthode des mélanges, en versant le globule dans l'eau du calorimètre. Il a reconnu que la température augmente avec celle du creuset ; si l'on projette de l'eau bouillante dans le creuset, elle retombe à la température qu'elle eût prise si elle avait été employée froide. Du reste, l'évaporation est d'autant plus rapide que la température du vase, et par suite celle du liquide, est plus élevée, contrairement à l'opinion de Klaproth.

[1] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. LXI, p. 319.

M. Baudrimont a aussi expérimenté avec l'acide sulfurique, l'alcool, l'esprit de bois, l'éther, l'essence de térébenthine, le sulfure de carbone; il a reconnu que la limite inférieure de température du vase pour laquelle il n'y a plus contact, est d'autant plus basse que la température d'ébullition est elle-même plus basse. Ayant projeté de l'acide sulfurique étendu d'eau, dans une capsule en platine maintenue à une température constante peu supérieure à la limite qui convient à ce liquide, il vit bientôt l'ébullition se produire, parce que le liquide se concentrant, sa température d'ébullition s'éleva assez pour que l'adhérence s'établit. La limite est au-dessous du rouge pour l'eau et les liquides plus volatils. Les liquides inflammables donnent souvent une flamme à l'ouverture du creuset, sans que le liquide cesse de présenter les mêmes phénomènes; seulement l'évaporation est plus rapide, à cause de la chaleur émise par la flamme.

Ces expériences permettent d'expliquer comment les dissolutions salines sont plus efficaces que l'eau pure pour tremper l'acier : au premier moment, il n'y a pas contact, et le métal est séparé du liquide par une enveloppe de vapeur ; ce n'est qu'après un refroidissement suffisant du métal, que ce contact s'établit, et que le refroidissement brusque nécessaire à la trempe commence à avoir lieu. Or, le contact se produit à une plus haute température dans l'eau salée, dont le point d'ébullition est plus élevé que celui de l'eau pure.

Dans ces expériences, on peut remplacer le corps solide par un liquide très chaud, comme Bellani l'a prouvé, dès 1858. M. Pelouze a vu une goutte d'eau rester sur de l'essence de térébenthine très chaude, quoique plus dense qu'elle. M. Boutigny a maintenu de l'eau, de l'alcool, de l'éther sur de l'acide sulfurique presque bouillant. Avec certaines précautions, il a pu empiler ainsi plusieurs liquides les uns sur les autres. M. Choron a vu prendre la forme globulaire à de l'éther projeté sur de l'eau, du mercure, de l'huile, de l'acide nitrique fumant, à la température de 54° au moins.

Cas de grandes masses liquides. — Ces phénomènes peuvent se manifester avec de grandes masses liquides. M. Pouillet a pu remplir entièrement d'eau un grand creuset de platine rouge blanc, et l'y conserver pendant des heures sans que son poids diminuât notablement. En 1827, J. Perkins vit l'eau, dans des cylindres de bronze portés au rouge, refuser de passer à travers une fente faite accidentellement à la partie inférieure; l'eau était pressée par son poids, qui était assez grand, car le cylindre avait 8 pouces de diamètre. Il y avait aussi une forte pression de vapeur, mais comme elle agissait de tous les côtés sur la masse d'eau qui était séparée des parois qu'elle ne mouillait pas, il n'y a pas à en tenir compte. Cette remarque ôte à cette expérience tout le merveilleux qu'on y trouve ordinairement. Perkins adapta aussi un tuyau en fer muni d'un robinet, à une petite chaudière à vapeur qu'il fit rougir, puis il y introduisit de l'eau, et pendant que la vapeur s'échappait avec violence par une soupape de sûreté chargée à 50 atmosphères, pas une goutte d'eau ne pénétrait dans le tube de fer, dont le robinet restait ouvert.

Ayant ensuite laissé refroidir l'appareil, la vapeur se produisit tout à coup avec un mugissement épouvantable.

Mouvements du globule. — M. Laurent a étudié particulièrement les mouvements qu'éprouve un globule d'eau sur une surface très chaude [1]. Ce globule présenta, en oscillant dans ses différentes parties, la forme d'une étoile ayant toujours un nombre pair de dents (*fig*. 692), et tournant rapidement sur elle-même. Cette apparence est due aux oscillations de la goutte qui est refoulée par la vapeur qui s'échappe en-dessous et vibre par son élasticité de cohésion, en prenant alternativement les formes dessinées dans la figure en A et B. Le nombre des dents dépend du nombre de points refoulés, et la symétrie de forme du globule amène naturellement les mouvements à se faire suivant des subdivisions régulières. Comme ces mouvements se font alternativement dans deux sens opposés en chaque point, on voit pourquoi on aperçoit un nombre pair de dents.



Fig. 692.

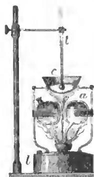


Fig 693.

957. M. Boutigny a publié, en 1842, une longue série d'expériences ingénieuses, où il s'est appliqué à varier de toutes façons les circonstances des phénomènes, qu'il a désigné sous le nom de *phénomènes de caléfaction* [2]. Il a trouvé la limite inférieure de température d'un vase métallique, pour que le liquide prenne la forme globulaire, à 142°, 134°, 61°, pour l'eau, l'alcool absolu et l'éther. Cette limite est donc d'autant plus basse que le liquide est plus volatil, comme M. Baudrimont l'avait déjà constaté. M. Boutigny a trouvé que la température du liquide est indépendante de celle du vase, ce qui est en opposition avec les expériences antérieures, et il a confirmé le fait de l'accroissement de l'évaporation avec la température.

Pour faire ces sortes d'expériences, un des moyens les plus commodes consiste à chauffer la capsule dans la flamme d'un éolipyle à jet vertical (*fig*. 693); une lampe à alcool *l* fait bouillir de l'esprit de vin contenu dans un vase annulaire *a*. La vapeur sort verticalement par un tube recourbé, s'enflamme et se précipite sur le fond de la capsule *c*, qui ne tarde pas à rougir.

Une des expériences les plus frappantes de M. Boutigny a été faite avec l'acide sulfureux anhydre, qui bout à — 10°. Projeté dans un creuset incandescent, ce liquide prend la forme globulaire et reste au-dessous de son point d'ébullition, c'est-à-dire au-dessous de — 10°. Si l'on y plonge un petit matras

[1] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. LXXIV, p. 19.

[2] Nouvelle branche de physique, ou étude sur les corps à l'état sphéroïdal, etc.

rempli d'eau, on le retire avec l'eau congelée. Si l'on verse quelques gouttes d'eau sur l'acide sulfureux, elle se congèle de même. On forme donc de la glace au fond d'un creuset, quoiqu'il soit incandescent.

M. Faraday a congelé le mercure au milieu d'un mélange d'éther et d'acide carbonique solide, qui avait pris la forme globulaire dans un creuset ardent. Il versa d'abord l'éther, puis l'acide solide, et y plongea ensuite une petite capsule en métal, contenant 31 grammes de mercure, qui fut congelé au bout de 2 ou 3 secondes. Ici nous avons un globule qui est probablement à une température de —100°.

958. Théorie de ces phénomènes. — Deux circonstances sont à expliquer : 1° l'absence de contact entre la surface chaude et le liquide ; 2° la lenteur d'échauffement du liquide, lenteur telle qu'il ne peut entrer en ébullition.

1° Répulsion exercée par la surface chaude. — Musschenbroeck avait déjà expliqué la cessation de l'adhérence entre le liquide et la surface, par « la répulsion de la matière du feu qui s'échappe des parois du vase. » Nous savons (I, 211) qu'un liquide cesse de mouiller une surface, quand sa cohésion propre est plus grande que le double de sa cohésion pour le solide. Or, cette dernière cohésion est diminuée par la chaleur, et nous avons vu qu'un liquide qui mouille le verre, cesse de le mouiller à une température suffisamment élevée, et est déprimée dans un tube capillaire (I, 230). Alors, non seulement il n'y a plus de contact, mais encore il s'exerce une répulsion capable de vaincre des poids, comme dans l'expérience de Perkins (956). M. Boutigny démontre l'existence de cette répulsion par deux expériences curieuses : 1° il verse quelques gouttes d'eau dans un panier en fils de platine incandescent, et l'eau ne tombe pas par les mailles; 2° il imprime un mouvement rapide de rotation, comme à une fronde, à une capsule incandescente contenant un liquide; la force centrifuge ne peut produire le contact, et ce n'est qu'après que la capsule s'est refroidie, que la vaporisation a lieu, ce que l'on reconnaît en voyant se former un nuage annulaire de vapeur.

Une fois le contact détruit, la vapeur qui se forme par la surface inférieure du globule concourt à l'écarter de la surface solide, et, en s'échappant sur le pourtour d'une manière inégale, elle produit les mouvements singuliers observés par M. Laurent. Si le fond de la capsule est convexe, des bulles de vapeur s'échappent à travers le globule. M. Person a trouvé la tension de la vapeur entre la surface chaude et le liquide, constamment égale à la pression atmosphérique augmentée du poids d'une colonne du même liquide ayant pour hauteur l'épaisseur du globule. Pour mesurer cette tension, il introduisait à travers le globule, jusqu'au fond du vase, la pointe effilée d'un tube recourbé en S, dont la courbure inférieure contenait du liquide; la vapeur entrant par l'extrémité effilée déterminait une différence de niveau égale à l'épaisseur du globule.

Nous ajouterons que cette vapeur interposée semble elle-même éprouver une répulsion de la part de la surface rouge : en effet, M. Boutigny a reconnu

qu'une capsule d'argent incandescente n'est pas attaquée par l'acide azotique; une capsule de cuivre, par le même acide et par l'ammoniaque; une capsule de fer, de zinc, par l'acide sulfurique. Il est facile de concevoir que le liquide, qui ne touche pas la surface, ne l'attaque pas; mais les vapeurs qui les séparent exerceraient leur action chimique, si elles n'éprouvaient pas elles-mêmes une répulsion qui les empêche de venir au contact.

2° **Mode d'échauffement du globule** — Une fois l'absence de contact expliquée, il reste à montrer pourquoi la masse liquide reçoit assez peu de chaleur pour que, l'évaporation l'enlevant à chaque instant, la température ne puisse atteindre au point d'ébullition. D'abord, la chaleur n'arrive au liquide que sous forme de rayons émanant de la surface chaude, une partie de ces rayons est réfléchie par la surface du liquide; l'autre pénètre; mais comme le liquide est diathermane, cette chaleur le traverse en grande partie sans être absorbée, et la proportion absorbée est d'autant plus petite que la température est plus élevée (733). Le liquide s'échauffera donc difficilement, et comme la chaleur lui est enlevée par l'évaporation d'autant plus rapidement qu'il est plus volatil, sa température sera d'autant plus basse que son point d'ébullition est lui-même plus bas. M. Pouillet et M. Laurent ayant mêlé à l'eau, de l'encre ou des parcelles de charbon, les rayons ont été absorbés en grande quantité par les matières en suspension, et l'évaporation a été beaucoup plus rapide. Si le mercure entre en ébullition dans un vase de verre, qu'il ne mouille pas, c'est que, étant athermane, toute la chaleur qu'il ne réfléchit pas est absorbée; de plus, il ne s'évapore que lentement.

M. Armstron signale en outre une cause qui empêche l'ébullition du globule; c'est que la chaleur rayonnée sur sa surface inférieure est employée presque totalement à produire à cette surface une évaporation abondante. Si l'on plonge un lingot de platine incandescent dans de l'eau froide, il n'y a pas de dégagement de vapeur, celle qui se produit se condensant au contact du liquide froid. Si cette eau est à 100°, elle continue à bouillir.

Nous voyons donc que les phénomènes qui se passent dans les vases incandescents s'expliquent naturellement et ne mettent nullement en défaut les théories actuelles de la chaleur. Cependant M. Boutigny croit nécessaire, pour les expliquer, d'admettre un quatrième état des corps, qu'il nomme l'*état sphéroïdal*, et sous lequel ils manifesteraient des propriétés particulières. A ce compte-là, le mercure serait à l'état sphéroïdal à la température ordinaire dans des vases de verre, de fer, de platine...; l'eau serait à cet état dans un vase recouvert de noir de fumée, sur les surfaces grasses, sur les feuilles de certaines plantes. Tous ces phénomènes dépendent simplement du rapport entre la cohésion propre du liquide et sa cohésion pour le corps sur lequel il s'appuie; la chaleur modifie ce rapport en diminuant la dernière, et quand celle-ci est moindre que le double de la cohésion propre du liquide, il n'y a plus contact, et la chaleur ne peut plus pénétrer qu'en petite quantité dans le liquide. Le seul fait qui semble difficile à expliquer, c'est que, dans les vases incandescents,

l'ébullition des liquides ne se fait pas, même dans le vide. M. Boutigny l'a constaté sur l'acide sulfureux même, en prenant la précaution d'entourer la capsule de bioxyde de plomb sec, pour absorber les vapeurs produites. Mais il faut remarquer que dans le vide l'évaporation se fait très rapidement (950), en enlevant par conséquent beaucoup de chaleur au liquide. En second lieu, nous verrons bientôt (960) que l'ébullition peut ne pas avoir lieu, même sous une pression très faible et à une haute température, dans un liquide dont on a chassé tout l'air. Or, un liquide contenu dans un vase incandescent doit perdre très rapidement l'air dissous, surtout quand on le met dans le vide.

959. Incombustibilité momentanée des tissus vivants. — Les phénomènes qui viennent de nous occuper donnent la clef de certains faits merveilleux qui paraissent d'abord inexplicables. Ainsi, il est bien constant que l'on peut plonger impunément la main dans du plomb, du cuivre, de la fonte en fusion ; on peut encore soulever un fer rouge, passer la langue sur sa surface sans se brûler, pourvu qu'il soit bien incandescent. On peut encore malaxer avec les mains une masse de verre en fusion plongée au milieu de l'eau. Ces faits étaient connus depuis longtemps des fondeurs, mais on n'y croyait pas généralement, lorsque M. Boutigny est venu les constater avec soin et les éprouver par lui-même. Depuis, chacun a pu facilement en faire l'expérience. On voit, dans une lettre écrite en 1808 à M. Tilloch [1], le détail d'expériences de cette nature, et à la suite, l'explication tirée de la comparaison avec ce qui se passe quand une goutte d'eau s'arrondit sur un corps incandescent. C'est là, en effet, l'explication développée par M. Boutigny : la surface de la peau est toujours humide, surtout sous l'influence de l'appréhension qu'on ne peut s'empêcher d'éprouver au moment de commencer l'expérience, et il n'y a pas contact entre la peau et le corps chaud. Il vaut mieux, du reste, mouiller la main avec de l'eau ou de l'éther. Si le métal en fusion est incandescent, on peut ressentir, par l'effet du rayonnement une vive impression dans les parties non immergées voisines de la surface du liquide. Il est évident qu'il ne faut prolonger l'épreuve que pendant un temps très court ; il ne faudrait pas pourtant, comme le remarque M. Boutigny, aller trop vite, car alors le choc de la main contre le métal en fusion pourrait vaincre la répulsion et produire le contact.

Nous avons vu que l'éther prend la forme globulaire sur l'eau à 100° ; M. Légal en a conclu qu'en mouillant sa main avec de l'éther, il pourrait impunément la plonger dans l'eau bouillante, ce que l'expérience a confirmé.

960. EFFET DE LA COHÉSION DU LIQUIDE SUR L'ÉBULLITION. — De même qu'on peut porter l'eau au-dessous de 0° sans qu'elle se congèle, de même on peut l'élever au-dessus de 100° sans que l'ébullition se produise. Il faut, pour cela, la priver complètement d'air. C'est Deluc qui, le premier, a obtenu ce résultat. Il a pu porter de l'eau purgée d'air et renfermée dans un matras à long col, à

[1] *Bibliothèque britannique* (Sciences et arts), t. XLI, p. 392.

la température de 112°, sans qu'il y eût ébullition. Il a constaté aussi que l'alcool des thermomètres ne peut bouillir que très difficilement quand on l'a complétement purgé d'air. Deluc attribue ces résultats à la cohésion propre du liquide, qui fait que les molécules ne peuvent se séparer pour prendre l'état de vapeur. Si, au contraire, il y a de l'air dissous, ce gaz se sépare sous forme de petites bulles, qui produisent autant de solutions de continuité, c'est-à-dire de surfaces libres sur lesquelles la vapeur prend naissance[1]. Quand il n'y a pas d'air dissous, ce n'est qu'à la surface du liquide que la vapeur se forme facilement, la cohésion s'oppose partout ailleurs à sa production. Si l'ébullition continue dans un vase ouvert, c'est que l'air se renouvelle par la surface; si cela ne peut avoir lieu, comme lorsque le vase est surmonté d'un long col, l'ébullition se fait péniblement et par soubresauts.

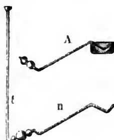


Fig. 694.

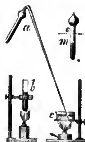


Fig. 695.

Cette explication a été reproduite, en 1846, par M. Donny[2], dans un travail très curieux, où il a aussi mis en évidence, par plusieurs expériences, les effets de la cohésion, dans les liquides purgés d'air. Ayant préparé avec soin une espèce de marteau d'eau A (*fig.* 694), il en plongea l'extrémité dans de l'eau salée, à une température de plus de 130°, sans qu'il y eût ébullition; cependant la pression exercée à la surface de l'eau, qui était froide, était extrêmement faible. Vers 138°, il y eut une vaporisation brusque, et l'eau fut lancée violemment dans les boules; d'autres fois, l'appareil fut brisé avec explosion. La cohésion du liquide est donc capable de résister à un effort de tension de 3 atmosphères, qui est la force élastique de la vapeur à 135°.

Si l'eau est aérée, et si même on ajoute, comme on le voit en B, un tube *t* de 30 centimètres de hauteur, rempli de mercure, la vapeur se forme à la température qui dépend de la pression exercée sur le liquide, et elle le repousse fort paisiblement dans les boules.

Dans une autre expérience, M. Donny prit un tube portant une boule *a* (*fig.* 695) surmontée d'une partie effilée, de plus de 1 mètre de longueur et replié vers le bas, et remplit ce tube d'eau distillée bouillante. Pour cela, il le chauffait pour chasser l'air, puis le laissait refroidir pendant que la pointe plongeait en *c* dans de l'eau bouillante[3]. Il faisait de nouveau bouillir, plongeait

[1] *Introduction à la physique terrestre.*

[2] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XVI, p. 167.

[3] C'est par ce moyen que le tube A (*fig.* 694) a été purgé d'air, seulement on terminait l'opération en le scellant à la lampe au-dessus de la boule.

la pointe dans du mercure, et quand l'appareil se refroidissait, le mercure montait dans le tube effilé comme dans un baromètre. Il fit alors chauffer graduellement le tube *a*, la pointe étant toujours plongée dans du mercure, et il se produisit des soubresauts de plus en plus violents, qui finirent par faire éclater la boule, dont les fragments furent lancés à une assez grande distance.

M. Donny plongea encore dans l'eau bouillante un marteau d'eau *m* (*fig.* 695) purgé d'air avec beaucoup de soin, et quand la température fut à 100°, il le coupa en *o*, et le chauffa immédiatement avec rapidité dans la flamme d'une lampe à esprit de vin, comme on le voit en *b*. Il se produisit bientôt une explosion violente, et toute l'eau fut projetée hors du tube.

Citons encore l'expérience suivante : M. Galy-Cazalat purgea d'air, par l'ébullition, de l'eau renfermée dans un ballon de verre et recouverte d'une couche d'huile. Cette eau ayant été refroidie, il l'échauffa graduellement jusqu'à 123° sans qu'elle bouillît. Quelques instants après, il se fit une explosion de vapeur qui lança une grande partie de l'eau hors du ballon; d'autres fois, le ballon fut brisé. Ces faits permettent d'expliquer certaines explosions de chaudières à vapeur, comme nous le verrons plus loin.

961. INFLUENCE DES SUBSTANCES DISSOUTES, SUR L'ÉBULLITION. — La température de l'ébullition n'est pas modifiée par les substances mélangées ou en suspension dans les liquides ; il n'en est plus de même quand ces substances sont combinées ou en dissolution. Si l'on dissout dans un liquide un autre liquide plus volatil, le point d'ébullition est abaissé, et d'autant plus que la proportion du liquide volatil est plus grande. C'est ce qui a lieu quand on dissout de l'alcool dans l'eau. Le contraire a lieu si le liquide combiné est moins volatil, par exemple quand on ajoute de l'acide sulfurique à l'eau. La vapeur qui se produit est tantôt un mélange de celle des deux liquides, tantôt une combinaison en proportion définie, comme cela a lieu pour certains acides à un degré déterminé de concentration.

Dissolutions salines. — Les sels dissous dans l'eau retardent toujours son point d'ébullition, et d'autant plus que la proportion de sel est plus grande. Par exemple, de l'eau contenant 10, 20, 30,40 pour cent de sel marin, bout à 101°,5; 103°,5; 105°,5 et 108°. M. Legrand a étudié cette question en détail[1]; il a reconnu que la température d'une dissolution non saturée s'élève peu à peu à mesure qu'elle se concentre par l'évaporation, et qu'elle finit par devenir fixe; alors elle est saturée. En représentant les retards de l'ébullition par les ordonnées d'une courbe dont les abcisses représentent les quantités de sel dissoutes dans 100 parties d'eau, il a trouvé deux classes générales de courbes, les unes n'ayant qu'un sens de courbure, tantôt convexe, tantôt concave vers l'axe des abcisses, et les autres ayant un point d'inflexion qui suit ou précède la partie convexe vers le même axe; les ordonnées croissant toujours

[1] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. LIX, p. 423.

avec les abcisses. Du reste la faculté de retarder le point d'ébullition ne dépend pas seulement de la solubilité, mais elle paraît due principalement à une affinité spéciale du sel pour l'eau.

On ne doit pas prendre pour point d'ébullition d'une dissolution saturée, la température au moment où le sel commence à se déposer, mais celle qui a lieu pendant qu'il se dépose. En effet, malgré l'agitation du liquide pendant l'ébullition, le point de saturation est dépassé et la température s'élève de plus en plus; mais, dès que le dépôt du sel a commencé, cette température descend et ne varie plus. Par exemple, M. Legrand a vu une dissolution de carbonate de potasse atteindre 140°, sans déposer de sel; puis, tout à coup, une grande effervescence se manifesta, accompagnée d'un dépôt abondant, la température descendit à 135°, et ne varia plus.

M. Legrand a encore remarqué que l'ébullition d'une dissolution saline dans des vases de verre est d'abord régulière, mais qu'elle se fait ensuite par soubresauts quand l'air dissous a été chassé. Des parcelles métalliques lui rendent sa régularité. Il y a des sels qui, ajoutés, même en petite quantité, à l'eau, déterminent la production des soubresauts; tel est le tartrate neutre de potasse. D'autres, au contraire, les empêchent.

Voici le tableau des principaux résultats trouvés par M. Legrand :

SELS en dissolution.	POIDS DE SEL dans 100 d'eau.	POINT d'ébullition.
Chlorure de sodium	41,2	108°,4
— potassium	59,4	108,3
— barium	60,1	104,4
Carbonate de soude	48,5	104,63
Phosphate de soude	112,6	106,6
Chlorate de potasse	61,5	104,2
Nitrate de soude	224,8	121,0
Nitrate d'ammoniaque	infini	180,0
Sel ammoniac	88,9	114,2
Chlorure de strontium	117,5	117,85
Chlorure de calcium	325,0	179,5
Tartrate neutre de potasse	296,2	114,67
Carbonate de potasse	205	135
Nitrate de chaux	362	151
Acétate de soude	209	124,37
Acétate de potasse	798,2	169

962. Température de la vapeur des dissolutions. — Rudberg, à la suite d'expériences nombreuses et très exactes, a trouvé que *la vapeur fournie par une dissolution saline en ébullition possède la même température que si elle*

se dégageait de l'eau pure, bouillant sous la même pression. Il semble cependant que la vapeur devrait, en quittant le liquide, posséder la même température que lui, à moins d'admettre qu'en sortant par la surface, elle se détende et se refroidisse tout juste assez pour revenir à la température qui correspond à la pression extérieure. M. Regnault est parvenu à rendre compte des résultats observés par Rudberg. Il a d'abord constaté, au moyen d'un appareil que nous décrirons plus loin (*fig.* 708), et en employant des pressions variant de $0^m,057$ à $3^m,124$, que ces résultats sont vrais pour des pressions différentes de celles de l'atmosphère. La température de la vapeur a bien été un peu supérieure à celle qu'aurait donnée l'eau pure; mais les excès sont si faibles qu'on peut les attribuer au rayonnement de la surface du liquide salé, et aux gouttelettes qu'il projette en bouillant. M. Regnault a ensuite expérimenté sur des dissolutions d'acide sulfurique contenant assez d'eau pour que l'acide ne passât pas en vapeur. Le liquide était placé dans un ballon dont le large col était surmonté de tubes rentrant les uns dans les autres comme dans l'hypsomètre (*fig.* 691), et soutenant un thermomètre qu'on pouvait ainsi placer à différentes distances du liquide. Il observa que le thermomètre se recouvre constamment d'une couche d'eau; et il est facile de voir qu'il ne doit donner, dans ces conditions, que la température d'ébullition de l'eau pure qui l'enveloppe. M. Regnault a alors adapté au-dessus du réservoir, un disque mince en cuivre, pour recueillir l'eau qui ruisselle principalement de la tige, et un autre au-dessous du réservoir, pour le préserver du rayonnement du liquide et des gouttelettes qu'il projette. Quand l'instrument ainsi disposé est placé à plus de 4 centimètres de la surface du liquide, le réservoir est mouillé et le thermomètre indique la température d'ébullition de l'eau pure. Quand on l'abaisse, le réservoir se sèche, et la température monte, jusqu'à ce qu'il touche le liquide. M. Regnault conclut de là que la vapeur est en équilibre de température avec la dissolution bouillante, mais qu'elle se refroidit promptement, par le refroidissement extérieur et surtout par l'évaporation des gouttelettes lancées par le liquide. Quant au thermomètre, il ne peut qu'indiquer la température qui correspond à l'ébullition de l'eau pure, à cause du liquide qui le mouille. Les résultats observés par Rudberg sont donc exacts, et l'on voit comment on peut les expliquer.

963. Applications des lois de l'ébullition. — On fait, dans l'industrie, des applications fréquentes des principes de l'ébullition, pour distiller les liquides, ou pour concentrer les dissolutions.

Alambic. — Pour séparer l'eau des matières solides qu'elle tient en dissolution, on la distille au moyen de l'*alambic*. Cet appareil très ancien, dont l'invention est attribuée aux Arabes, a reçu depuis un demi-siècle de nombreux perfectionnements, ayant pour objet d'accélérer l'opération et d'économiser le combustible. Tel qu'on l'emploie le plus souvent, il se compose de trois parties (*fig.* 696) : la *cucurbite* oC, le *chapiteau* c et le *réfrigérant* RSr. La cucurbite contient le liquide que l'on veut distiller. Ce liquide étant porté à l'ébullition, sa vapeur s'élève dans le chapiteau et passe dans un serpentin S, entouré d'eau

froide, où elle se liquéfie; sa tension étant plus grande que celle qui correspond à la température du serpentin. Le liquide, ainsi régénéré, sort en *r*. Comme l'eau du réfrigérant s'échauffe rapidement par la chaleur latente qu'abandonne la vapeur qui se condense, il faut la renouveler souvent; le mieux est de la faire arriver d'une manière continue par un tube extérieur *t'*, qui la conduit au fond du réfrigérant; tandis que l'eau chaude supérieure s'échappe par un trop-plein et s'écoule par le tube *t*. On renouvelle le liquide dans la cucurbite par l'orifice *o*, sans avoir besoin de démonter l'appareil.

C'est avec l'alambic qu'on distille le vin pour en séparer l'alcool, qui, étant plus volatil que l'eau, distille en plus grande proportion. L'eau-de-vie, ainsi obtenue, étant distillée de nouveau, donne l'alcool du commerce.

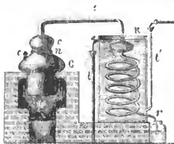


Fig. 696.

Au moyen de l'alambic, on peut, sur les navires, se procurer de l'eau douce en distillant l'eau de mer. Il résulte d'expériences de MM. Clément et de Freycinet, que l'eau douce ainsi obtenue ne coûte pas plus de 1 centime le litre, et que le charbon nécessaire à sa production n'occupe que $\frac{1}{6}$ de l'espace qu'elle occuperait, et ne pèse que $\frac{1}{8}$ de son poids. Un grand nombre de personnes, soumises au régime exclusif de cette eau, s'en sont trouvées aussi bien que de l'eau douce naturelle.

Concentrations. — Quand on ne tient pas à recueillir le liquide qui passe en vapeur, par exemple quand on veut concentrer une dissolution, on emploie différents moyens. On peut opérer à la température ordinaire en accélérant l'évaporation par un courant d'air, comme dans les *bâtiments de graduation* des salines : on fait tomber l'eau salée à la partie supérieure d'une espèce de mur construit avec des fagots, et orienté perpendiculairement à la direction habituelle du vent. Le liquide disséminé à travers le menu branchage, présente à l'air une grande surface par laquelle se fait une évaporation abondante.

Quand on veut employer l'action de la chaleur et quand la température ne doit pas être trop élevée, on fait le vide au-dessus des chaudières de concentration, tantôt en chassant l'air par la vapeur même et fermant ensuite toutes les ouvertures, tantôt au moyen de machines pneumatiques. L'ébullition se fait alors à une température inférieure à 100°. La vapeur est condensée dans des réfrigérants, et le liquide régénéré se rend dans un vase fermé, d'où on l'extrait de temps en temps. Cette méthode est appliquée en grand dans les raffineries de sucre, pour concentrer les sirops.

IV. Liquéfaction des vapeurs et des gaz.

964. Quand une vapeur sature un espace, on peut, pour la liquéfier, employer deux moyens : le refroidissement ou la compression. Si la vapeur n'est pas à son maximum de tension, il faut commencer par l'amener à cet état, soit en diminuant son volume, soit en abaissant sa température. Les substances qui se présentent habituellement à l'état gazeux doivent être considérées comme des vapeurs très éloignées du point de saturation. On pourra donc les liquéfier en les amenant à ce point, par un refroidissement suffisant, ou par une grande compression, ou enfin par ces deux moyens réunis. Il y a des gaz qui se liquéfient facilement, comme l'acide sulfureux, qu'il suffit de porter à —10°, sous la pression de 760^{mm}. L'acide hypoazotique peut être considéré comme à la limite des substances liquides et de celles qui sont gazeuses à la température ordinaire ; car il se liquéfie à +28 degrés.

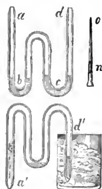


Fig. 697.

Le premier gaz qu'on ait liquéfié est le gaz ammoniac. Van-Marum ayant comprimé de l'air autour d'une éprouvette remplie de ce gaz et reposant sur le mercure, vit ce liquide monter peu à peu, puis tout à coup remplir complètement l'éprouvette. L'acide sulfureux a été liquéfié par Monge et Clouet, en le faisant arriver sec dans un vase à 10° au-dessous de zéro.

En 1823, Davy et M. Faraday sont parvenus à liquéfier le chlore et quelques autres gaz, par une méthode très simple[1] : on introduit dans un tube de verre très épais courbé en forme d'U, les ingrédiens qui, mélangés et échauffés, doivent produire les gaz, on les rassemble à l'une des extrémités qui est bouchée, puis on ferme l'autre à la lampe et on la plonge dans un mélange réfrigérant. On chauffe alors l'extrémité opposée, pour faire dégager le gaz, qui, ne pouvant s'échapper, s'accumule dans le tube, et se dépose à l'état liquide dans l'extrémité refroidie. — Quand les substances mélangées réagissent à la température ordinaire, comme on ne pourrait fermer le tube, à cause de l'expansion du gaz qui écarterait les parties ramollies du verre, on met une des substances dans une petite nacelle en platine, qui repose sur l'autre substance, et qu'on renverse par des secousses quand on veut faire dégager le gaz. On peut encore employer un tube recourbé comme en *abcd* (*fig.* 697); les substances sont introduites en *b* et c, et après avoir fermé les extrémités *a* et *d*, on renverse le tube *a'd'* en faisant passer les substances dans la même

[1] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. XXII, p. 323.

extrémité. Pour mesurer la pression du gaz, M. Faraday introduisait dans le tube, un petit manomètre à air formé d'un tube effilé *no*, dans la partie moyenne duquel était engagée une bulle de mercure, dont la position, sur une graduation établie d'avance, indiquait la pression.

M. Davis Guilbert a indiqué un moyen d'obtenir approximativement le poids spécifique du liquide formé. Ce moyen consiste à renfermer dans le tube, de petites ampoules en verre, de densités différentes ; le liquide a la même densité que celle qui flotte au milieu de sa masse.

M. Pouillet a liquéfié plusieurs gaz par un moyen qui lui a permis d'évaluer avec plus d'exactitude la pression sous laquelle ils se condensent. Il a employé pour cela l'appareil qui lui a servi à comparer la compressibilité des gaz (1,321). L'*acide carbonique* s'est liquéfié sous 45 atmosphères, le *protoxyde d'azote* sous 43, l'*ammoniaque* sous 5, et l'*acide sulfureux* sous 2 $\frac{1}{2}$ atmosphères, la température étant d'environ 10°.

965. Liquéfaction et solidification de l'acide carbonique. — On n'avait liquéfié les gaz qu'en petite quantité, et aucun n'avait pu être solidifié, lorsque M. Thilorier, en 1835, est parvenu, non seulement à obtenir de grandes quantités d'acide carbonique liquéfié, mais encore à congeler le liquide obtenu. L'appareil de M. Thilorier consiste en un vase en fonte V (*fig.* 698), mobile autour d'un axe *oo'* ; sa capacité est de 6 à 7 litres. On y introduit du bicarbonate de soude (1800gr), de l'eau à 35 ou 40° (4 $\frac{1}{2}$ litres), et l'on remplit d'acide sulfurique (1000gr) l'éprouvette en cuivre c, puis on ferme l'ouverture du réservoir au moyen d'un bouchon à vis. On fait ensuite tourner ce réservoir autour de *oo'*, l'acide sulfurique se répand sur le bicarbonate de soude, et l'acide carbonique se dégage. On reçoit ce gaz dans un récipient A, dans lequel il passe par un tube en cuivre *t*, ajusté au moyen d'écrous roulants. En *r* et en *r'* sont des robinets qui doivent retenir le gaz sous les plus fortes pressions. On voit en R une disposition très simple qui remplit bien cette condition : une vis terminée par une pointe conique s'applique exactement sur l'orifice du conduit par lequel arrive le gaz, de manière que, en l'enfonçant, l'ouverture de ce conduit est solidement fermée. L'acide carbonique se liquéfie dans le récipient A, parce que la température y est moins élevée que dans le réservoir V, où elle est au moins de 30°. Si la température en A est de 15°, la tension du gaz sera de 50 atmosphères. Quand le bicarbonate de soude a dégagé tout l'acide carbonique qu'il contenait, on ferme le robinet *r'*, et l'on charge de nouvelles substances, le réservoir V. En répétant cette opération cinq ou six fois, on peut obtenir deux litres d'acide carbonique liquide.

L'appareil de M. Thilorier devant supporter des pressions énormes, la fonte avec laquelle on le construisait d'abord, n'offre pas une sécurité suffisante A l'Ecole de pharmacie de Paris, un appareil éclata et emporta les deux jambes au préparateur, M. Hervy.— M. Deleuil est parvenu à consolider les récipients en fonte au moyen de cercles de fer très épais, se croisant avec des bandes

épaisses de même métal, qui enveloppent tout l'appareil d'une sorte de réseau susceptible d'une énorme résistance. — MM. Mareska et Donny ont imaginé une autre disposition avec laquelle on obtient une résistance encore plus grande. Un vase en plomb est appliqué exactement sur un autre vase, en cuivre, entouré de cercles en fer forgé juxta-posés (*fig.* 698). Les deux fonds sont soutenus par des plaques de fer reliées au moyen de barres de même métal. De semblables vases peuvent résister à des pressions de plus de 1000 atmosphères, et dans les expériences sur l'acide carbonique, on ne dépasse pas 150 atmosphères.

Quand on veut recueillir l'acide carbonique liquide, on incline le récipient A de manière que le tube qui aboutit au robinet *r'* plonge dans le liquide, et l'on ouvre ce robinet; le liquide est projeté avec force dans le vase où on le reçoit. Là ce liquide s'évapore, la chaleur latente absorbée le refroidit jusqu'à — 70°, et une partie du liquide se solidifie.

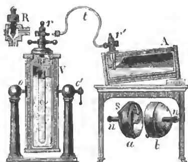


Fig. 698.

Un jet de gaz carbonique, sortant sous une pression de 30 ou 40 atmosphères, se refroidit tellement en arrivant à l'air libre par la dilatation énorme qu'il éprouve, que, non seulement il se liquéfie, mais encore il se solidifie; de sorte que le jet est accompagné de flocons blancs qui voltigent dans l'air. M. Thilorier, pour les rassembler, fait arriver le jet dans une boîte ronde composée de deux parties *a* et *b* (*fig.* 698), pouvant s'adapter l'une à l'autre. Le gaz arrive tangentiellement par un tube *s*, et rencontre à son entrée, une petite lame oblique qui lui fait prendre un mouvement de rotation, de manière que les flocons se rassemblent en une masse spongieuse. Des tubes *n*, *n* établissent la communication entre l'intérieur de la boîte et l'air atmosphérique. Un thermomètre placé dans le jet d'acide carbonique descend jusqu'à — 93°.

L'acide carbonique neigeux se volatilise lentement à l'air, ce qui tient à la chaleur latente enlevée par les parties qui passent à l'état gazeux, et à sa mauvaise conductibilité. Placé sur un corps poli, il fuit la main qu'on en approche; ce qui s'explique par la réaction du gaz dégagé du côté de la main, qui lui fournit de la chaleur. Posé sur la peau, il ne produit pas de sensation bien vive de froid; c'est qu'il en est séparé par l'atmosphère de gaz qui se dégage. Mais si l'on établit le contact en appuyant dessus, on éprouve une sensation douloureuse, semblable à celle d'une brûlure, et la peau est brunie comme si l'on avait touché un fer rouge.

Si l'on mêle de l'acide carbonique neigeux avec de l'éther, qui le rend bon

conducteur, l'évaporation devient plus active et la température s'abaisse à — 90°. Dans le vide, elle va jusqu'à 100°. Ce mélange réfrigérant, nommé *mélange de Thilorier*, peut servir à congeler 1[kil] de mercure en peu de temps. M. Faraday s'en est servi pour congeler l'acide carbonique liquide, en masse compacte : il lui a suffi pour cela d'y plonger un tube contenant ce liquide. Le solide formé présente alors l'apparence d'un morceau de glace bien transparente.

966. Appareil de MM. Natterer et Bianchi. — M. Natterer a pu liquéfier, puis solidifier d'assez grandes quantités de gaz, en les comprimant dans un fusil à vent. Depuis, M. Bianchi a construit, sur les indications de M. Dumas, un appareil (*fig.* 699 et 700) destiné à condenser les gaz par la compression produite au moyen d'une pompe foulante. Le gaz desséché arrive par le tube *s* (*fig.* 699) dans la pompe *p* (*fig.* 700), qui le refoule dans un réservoir *os* en fer forgé, de 700[cm] cubes de capacité, et capable de supporter des pressions de 600 à 700 atmosphères. Une soupape à tête sphérique *s* empêche le gaz comprimé de sortir de ce réservoir. Comme certains gaz liquéfiés attaquent le fer, l'intérieur est recouvert d'une lame de cuivre. Le mouvement est imprimé à la pompe foulante au moyen d'un arbre coudé muni d'un volant *m* (*fig.* 700); la pièce *r* sert à guider la tige du piston. Un gros tube *e*, dans lequel circule de l'eau, refroidit le corps de pompe, qui s'échauffe rapidement, tant par la chaleur que développe le frottement que par celle qui se dégage du gaz comprimé. Enfin, un vase G (*fig.* 699 et 700), vissé au bas du réservoir *os*, contient de la glace ou un mélange réfrigérant. Quand on veut recueillir le liquide obtenu, on sépare le réservoir de la pompe foulante, et l'on fait sortir ce liquide par l'orifice *o*, en renversant l'appareil et retirant le bouchon à vis. Le liquide est reçu dans un tube en verre mince de 3 ou 4[cm] de diamètre, ajusté au moyen d'un bouchon, au col d'un flacon contenant de la ponce sulfurique (*fig.* 701). Sans cette précaution, l'humidité se congèlerait sur le tube et empêcherait de voir dans l'intérieur[1].

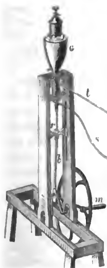


Fig. 699.



Fig. 700.

[1] Dans le cas du protoxyde d'azote, le piston ne doit pas être enduit avec un corps gras, mais seulement mouillé avec de l'eau ; car le protoxyde d'azote brûlerait le corps gras, sous l'influence de la chaleur dégagée par la compression de ce gaz.

Cet appareil a été employé particulièrement pour liquéfier le protoxyde d'azote. Le liquide obtenu produit, en s'évaporant, un froid très intense, capable de le congeler sous le récipient de la machine pneumatique. La température est si basse que les métaux qu'on y plonge produisent le même bruit qu'un fer rouge dans l'eau. Liquide ou solide, le protoxyde d'azote produit sur la peau le même effet qu'une forte brûlure. Le liquide est plus froid que l'acide carbonique solide mêlé d'éther, car le tube étant plongé dans ce mélange, le protoxyde d'azote liquide entre en ébullition. Le mercure se congèle dans le tube. Si l'on y jette un charbon incandescent, il brûle avec un éclat très vif, comme dans le protoxyde gazeux (*fig.* 701), et l'on a, dans un même tube, une chaleur rouge-blanc, et au-dessous une température capable de congeler le mercure. Si l'on mêle le protoxyde liquide à l'acide carbonique solide et à l'éther, le froid produit est tellement intense que l'alcool devient pâteux.

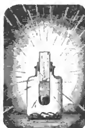


Fig. 701.

967. Nouvelles expériences de M. Faraday. — M. Faraday a repris, en 1845, ses expériences sur la liquéfaction des gaz, en profitant du froid intense que l'on peut obtenir avec l'acide carbonique solide[1]. Le gaz était refoulé par un long tuyau en cuivre, dans un tube en U, dont la partie courbe était plongée dans le mélange de Thilorier (965). Pour comprimer ce gaz, on employait deux pompes foulantes de petit diamètre, dont la dernière recevait le gaz comprimé à 10 ou 20 atmosphères par la première, et le comprimait à son tour jusqu'à 50 atmosphères. Quand on voulait obtenir un froid très intense, le mélange réfrigérant était placé sous un récipient tubulé, dont la tubulure était traversée par l'une des branches du tube en U ; une boîte à étoupes permettait d'abaisser ou de soulever ce tube pour voir dans l'intérieur de la partie courbe. Quand on faisait le vide sous le récipient, la température s'abaissait à — 110°, tellement que la tension du gaz dégagé du mélange n'était que de 30^{mm} environ.

Il n'y a que *cinq* gaz qui n'ont pas pu encore être liquéfiés : l'*hydrogène*, l'*oxygène*, l'*azote*, l'*oxyde de carbone* et le *bioxyde d'azote*. Les deux premiers ont été soumis à une pression de 27 atmosphères, l'oxyde de carbone à 40 atmosphères, et l'azote et le bioxyde d'azote à 50 atmosphères, la température étant portée pour tous à — 110°. Remarquons que ces gaz sont ceux qui entrent, eux ou leurs éléments, dans la constitution des êtres organisés. Voici le tableau des gaz qui ont pu être liquéfiés ou solidifiés, avec le point de congélation de ces derniers.

Les gaz dont les noms sont précédés d'un (*) peuvent se liquéfier, sans compression, par un froid de —80°. Pour ceux qu'on n'a pas pu congeler, la température a été portée à —110°. Les gaz colorés, le *chlore* et l'*oxyde de chlore*,

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XV, p. 257.

donnent des liquides colorés ; tous les autres donnent des liquides et solides incolores.

ONT ÉTÉ LIQUÉFIÉS seulement.	ONT ÉTÉ CONGELÉS.	
Gaz oléfiant.	* Acide bromhydrique à — 8°	* Ammoniaque à — 75°
Acide chlorhydrique.	* Cyanogène à — 35°	Acide sulfureux à — 76°
Acide fluoborique.	* Acide iodhydrique à — 51°	
Acide fluosilicique.	* Acide carbonique à — 58°	* Acide sulfhydrique à — 86°
Hydrogène phosphoré.	Oxyde de chlore à — 60°	Protoxyde d'azote à — 100°
* Hydrogène arséniqué.		
* Chlore.		

§ 3. — PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DES VAPEURS.

I Mesure des forces élastiques des vapeurs.

968. Méthodes de Dalton. — La mesure des tensions des vapeurs a été l'objet des travaux d'un grand nombre de physiciens ; ces tensions se mesurent toujours quand la vapeur est à saturation. Dalton, un des premiers, a construit des tables de tension donnant pour chaque température, la force élastique correspondante. Il se servait de l'appareil (*fig.* 683) ; il portait l'eau du manchon à une température donnée par plusieurs thermomètres plongés à différentes profondeurs, et la différence des hauteurs des colonnes de mercure dans les deux tubes barométriques, ramenée à 0°, donnait la tension de la vapeur. Cette méthode ne peut servir que jusqu'à 100°, au-delà le niveau dans le tube à vapeur descendant au-dessous de celui de la chaudière. Dalton employait alors le petit appareil (*fig.* 702) ; la tension était donnée par la différence de niveau *ab* dans les deux branches, augmentée de la hauteur du baromètre. Cette méthode n'est pas susceptible de précision, à cause de la difficulté de connaître la température moyenne de la colonne de mercure *ab*, pour la ramener à 0°. M. Regnault a reconnu aussi que la première, telle que l'employait Dalton, ne peut donner que des résultats approchés, à cause de la difficulté de rendre uniforme la température de la colonne d'eau du manchon.



Fig. 702.

Dalton a imaginé une autre méthode, qui permet d'opérer avec les plus faibles pressions comme avec les plus fortes ; elle est fondée sur ce principe que la

tension de la vapeur pendant l'ébullition est égale à la pression extérieure. Le liquide est renfermé dans une cornue c (*fig.* 703) munie d'une tubulure à laquelle est adapté un thermomètre *t*. Le col de la cornue est incliné, et communique avec un ballon B, dans lequel on peut comprimer ou raréfier l'air, par le tube à robinet *m*. La pression de cet air est donnée par le manomètre *b*. T est un manchon, dans lequel on fait passer un courant d'eau froide. On commence par établir une certaine pression dans l'intérieur de l'appareil, puis on fait bouillir le liquide, dont la température est donnée par le thermomètre *t*. La force élastique de la vapeur reste alors constamment égale à la pression qui règne dans l'appareil, car la vapeur produite est condensée au fur et à mesure, dans la partie du tube qu'enveloppe le manchon T. Avec cette méthode, les observations se font facilement, au moment que l'on choisit, et sans qu'on ait à

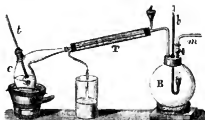


Fig. 703.

se préoccuper de maintenir la température constante; c'est sans contredit la plus sûre et la plus commode.



Fig. 704.

969. Cas des basses températures. — Gay-Lussac a employé la méthode suivante : le liquide est introduit dans un tube barométrique recourbé, comme on le voit en *na* (*fig.* 704). L'extrémité de la chambre vide plonge dans un mélange réfrigérant, et le liquide s'y rend tout entier par distillation (949). La vapeur prend alors la tension qui correspond à la température du mélange réfrigérant, température indiquée par un thermomètre, tandis que la tension est mesurée par la différence de niveau dans le tube à vapeur et dans le baromètre B. Gay-Lussac a reconnu ainsi que la glace produit de la vapeur, et que sa force élastique est égale à celle de l'eau à la même température.

970. Expériences de Dulong et Arago. — L'emploi de la vapeur comme force motrice, exige que l'on connaisse les températures qui correspondent à de fortes pressions. Au-dessus de 8 atmosphères on n'avait, avant 1839, que les observations faites jusqu'à 20 atmosphères, par M. Arzberger, qui mesurait la pression en évaluant l'effort qu'elle devait faire pour soulever une soupape de sûreté. Malgré les soins apportés à la construction de cette soupape, les

résultats ne pouvaient être qu'approchés. De plus, le thermomètre qui donnait la température étant plongé dans la chaudière à vapeur, la compression lui faisait indiquer une température trop élevée.

En 1829, Dulong et Arago, pour répondre à la demande faite par le gouvernement à l'Académie des sciences de Paris, mesurèrent la force élastique de la vapeur d'eau jusqu'à 24 atmosphères, en se servant d'un manomètre à air [1]. La *fig.* 705 représente l'appareil, imaginé par Dulong : *c* est une chaudière en tôle de 80 litres environ de capacité, formée d'une partie cylindrique et de deux parties hémisphériques, réunies par des boulons. On voit en *b* (*fig.* 706) le mode de jonction, et en *cc*, la manière dont est fixé, au moyen de boulons d'acier, le couvercle plan qui ferme la chaudière à sa partie supérieure. Des

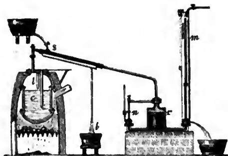


Fig. 705.

lames de plomb interposées empêchent toutes les fuites. Cette chaudière avait été essayée à une pression de 60 atmosphères ; elle était munie d'une soupape de sûreté, et disposée sur un fourneau d'une masse assez grande pour que les variations de températures y fussent trés lentes. Le couvercle de la chaudière communiquait par un tube en fer avec un réservoir en fonte *r* (*fig.* 705), contenant du mercure, qui s'élevait d'autre part dans le manomètre à air *m*, et dont le niveau s'observait dans le tube latéral *n*. Cette partie de l'appareil avait déjà servi à Dulong et Arago dans leurs recherches sur les lois de la compressibilité de l'air (I, 320), recherches entreprises à l'occasion de celles qui nous occupent. Le tube de communication *tsr* s'élève d'abord verticalement, puis descend obliquement jusqu'au réservoir *r*. La partie oblique contient de l'eau, et est continuellement refroidie par un courant d'eau, qui sort en *b*, de manière que ce tube reste toujours plein, la vapeur s'y condensant lorsque le niveau vient à baisser. Pour mesurer la température dans la chaudière, deux tubes de

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XLIII, p. 74.

fer *t*, *t'* (*fig.* 705 et 706) plongent dans son intérieur ; l'un s'enfonce dans l'eau, tandis que l'autre est seulement plongé dans la vapeur, ils sont remplis de mercure, dans lequel plongent deux thermomètres, qui sont ainsi préservés de la compression qui pourrait les briser ou fausser leurs indications. Ces deux thermomètres ont toujours été sensiblement d'accord ; la température de la vapeur a donc toujours été égale à celle de l'eau. La portion des tiges qui se trouvait hors des tubes *t*, *t'* était courbée horizontalement (*fig.* 706) et entourée d'un manchon en verre T, dans lequel on faisait passer un courant d'eau.

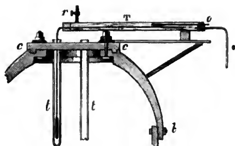


Fig 706.

La température de cette eau étant donnée par un thermomètre *o*, on faisait la correction.

Voici comment se faisaient les expériences ; après avoir mis l'eau de la chaudière en ébullition, et chassé l'air par la soupape momentanément soulevée, on réglait les robinets d'écoulement de l'eau en *m*, S et T ; on chargeait le fourneau d'une quantité de combustible en rapport avec la température que l'on voulait obtenir, et l'on attendait que la marche ascendante des thermomètres fût très lente ; quand elle avait atteint son maximum, on observait simultanément le manomètre et les thermomètres. Des observations faites quelques instants auparavant préservaient des erreurs de lecture. La pression était mesurée par la force élastique de l'air dans le manomètre, augmentée du poids de la colonne de mercure qui y était soulevée, comptée à partir du niveau dans le tube *n* (*fig.* 705), diminuée enfin du poids d'une colonne d'eau ayant pour hauteur la distance des niveaux S et *n*. La pression n'a pu être poussée que jusqu'à 24 atmosphères ; au-delà, la chaudière laissait perdre l'eau par les joints. A 24 atmosphères, la température était de 224°. Voici le tableau des résultats trouvés par Dulong et Arago. Les tensions qui correspondent aux températures supérieures à 224°, ont été calculées au moyen d'une formule d'interpolation que nous indiquerons plus loin (974). Les températures sont données par le thermomètre à mercure :

PRESSION en atmosphères.	PRESSION en mercure à 0°.	TEMPÉRATURE.	PRESSION sur 1 centim. carré en kilog.
1	0,76	100°	1,033
1,5	1,14	112,2	1,549
2	1,52	121,4	2,066
2,5	1,90	128,8	2,582
3	2,28	135,1	3,099
3,5	2,66	140,5	3,615
4	3,04	145,4	4,132
4,5	3,42	149,06	4,648
5	3,80	153,08	5,165
5,5	4,18	156,80	5,681
6	4,56	160,20	6,198
6,5	4,94	163,48	6,714
7	5,32	166,50	7,231
7,5	5,70	169,37	7,747
8	6,08	172,10	8,264
9	6,84	177,10	9,297
10	7,60	181,60	10,330
11	8,36	186,03	11,363
12	9,12,	190,00	12,396
13	9,88	193,70	13,429
14	10,64	197,19	14,462
15	11,40	200,48	15,495
16	12,16	203,60	16,528
17	12,92	206,57	17,561
18	13,68	209,40	18,594
19	14,44	212,10	19,627
20	15,20	214,70	20,660
21	15,96	217,20	21,693
22	16,72	219,60	22,726
23	17,48	221,90	23,759
24	18,24	224,20	24,792
—	—	—	—
25	19,00	226,30	25,825
30	22,80	236,20	30,990
35	26,60	244,85	36,155
40	30,40	252,55	41,320
45	34,20	259,52	46,485
50	38,00	265,89	51,650

971. Expériences de M. Regnault. — Le travail le plus étendu que l'on ait fait sur les tensions des vapeurs dans les basses températures et dans les plus élevées, est celui de M. Regnault. C'est aussi le plus remarquable, tant par la perfection des appareils que par l'exactitude des méthodes. Pour les températures inférieures à 0°, M. Regnault a employé la méthode de Gay-Lussac, en se servant pour refroidir le tube à vapeur, d'un mélange de neige et de chlorure de calcium, qui étant liquide, peut être agité, de manière que la température est mesurée avec plus de sûreté.

M. Regnault a reconnu, comme l'avait fait Gay-Lussac, que la vapeur fournie par l'eau à l'état liquide ou solide présente les mêmes tensions pour les mêmes températures ; il a constaté, en opérant de 0° à — 32°, que la courbe construite en partant de ces expériences, présente une continuité parfaite avec celle que donnent les tensions prises au-dessus de 0°. Des expériences faites sur l'*hydrocarbure de brome*, la *benzine* et surtout sur l'*acide acétique monohydraté*, ont conduit à la même conclusion. La dernière substance, qui fond à 16°, peut rester liquide au-dessus de ce terme, même quand on l'agite, ce qui permet d'opérer facilement aux mêmes températures sur la substance liquide et solide. La courbe des tensions données par l'acide solide a été d'abord un peu au-dessus de celle qui correspondait à l'acide liquide ; mais la substance ayant été distillée sur de l'acide phosphorique anhydre, pour lui enlever l'eau en excès qu'elle pouvait contenir, la courbe correspondante à l'acide solide s'est trouvée au contraire inférieure à l'autre ; c'est qu'il se forme un peu d'acétone, pendant la distillation. M. Regnault admet donc que les courbes coïncideraient, si la substance était pure ; à l'état liquide, l'eau en excès ou l'acétone sont disséminés dans la masse et n'exercent pas d'action sensible sur la tension ; mais, à l'état solide, la substance étrangère se sépare en partie, et son influence sur la tension devient plus prononcée.

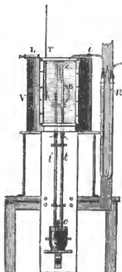


Fig 707.

Pour les températures comprises entre 0° et 50°, M. Regnault a d'abord employé la méthode de Dalton, en la débarrassant des causes d'erreur qui la rendent inexacte [1].

La *fig.* 707 représente la disposition adoptée : le baromètre *t'* et le tube à vapeur *t*, aussi semblables que possible, sont plongés dans une même cuvette munie d'une vis à deux pointes *o*, destinée à faciliter la vérification du baromètre *t'*. Ces tubes traversent des tubulures garnies de caoutchouc, placées au fond d'une caisse V en tôle galvanisée, portant antérieurement une glace verticale à travers laquelle on aperçoit le haut des tubes *t*, *t'*. La caisse est remplie d'eau qu'on agite continuellement, et dont on maintient la température constante au moyen d'une lampe à alcool, quand cette température est plus élevée que celle de l'air. On mesure au cathétomètre la différence de niveau dans les deux tubes, et l'on ramène la hauteur à 0°. Il est évident qu'il faut que le niveau du mercure dans le tube à vapeur se trouve toujours dans l'intérieur de la caisse.

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XI, p. 273.

Dans une autre série d'expériences, M. Regnault a procédé de la manière suivante : un ballon B, de 500^{cm} cubes environ (*fig.* 707), renferme une petite ampoule entièrement remplie de liquide purgé d'air. Ce ballon communique avec une tubulure en cuivre à trois branches *e*. La branche antérieure est fixée à un tube recourbé soudé à l'extrémité du tube à vapeur *t*, et la tubulure supérieure sert à mettre le ballon en communication avec une machine pneumatique, par l'intermédiaire de tubes *n* remplis de ponce sulfurique. Après avoir bien desséché l'appareil, en faisant le vide et laissant rentrer l'air un grand nombre de fois, on fait une dernière fois le vide aussi exactement que possible, puis on ferme à la lampe le tube *ei*. On enveloppe ensuite le ballon B, de glace fondante, et l'on mesure la tension de l'air sec qui est resté dans le ballon, en relevant au cathétomètre la différence des colonnes dans les tubes *t* et *t'*. On enlève ensuite la glace, et, chauffant le ballon avec quelques charbons, on fait éclater l'ampoule. On remplit ensuite la caisse V, d'eau que l'on chauffe à diverses températures ; la tension de la vapeur est donnée par la différence des colonnes, diminuée de la dépression produite par l'air qui reste dans le ballon, et la température est indiquée par un thermomètre T, plongé dans le bain, qu'on agite vivement.

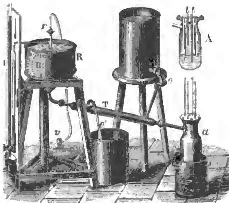


Fig. 708.

Pour les températures inférieures à 0°, la caisse V est remplacée par un vase de verre qui entoure le ballon seul, et dans lequel on met une dissolution de chlorure de calcium, dont on abaisse progressivement la température en y projetant de la glace. Cette méthode peut servir aussi pour des liquides autres que l'eau : des expériences faites sur le mercure ont donné pour la tension de la vapeur de ce liquide à 50° et à 100°, un peu moins de 0^{mm},1 et 0^{mm},5, en admettant que le mercure ne donne pas de vapeurs appréciables à 0°.

Méthode par l'ébullition. — M. Regnault a aussi employé la méthode de Dalton par l'ébullition. Une chaudière en cuivre *a* (*fig.* 708) communique par un tube oblique, avec un ballon B de 24 litres de capacité, renfermé dans un réservoir R contenant de l'eau à la température ambiante. Le tube oblique est entouré d'un manchon T, dans lequel on fait circuler de l'eau froide qui entre en *o* et sort en *o'*. Le ballon est surmonté d'un ajutage à deux branches, dans l'une desquelles on mastique le tube de l'appareil manométrique I, tandis que l'autre *r* est mise en communication avec une machine pneumatique ou une

pompe de compression, au moyen desquelles on peut établir dans tout l'appareil la pression que l'on veut, pression mesurée au moyen du manomètre I. La température de l'eau renfermée dans la chaudière *a* est donnée par quatre thermomètres plongeant dans des tubes en fer remplis de mercure Deux de ces tubes s'enfoncent dans l'eau bouillante, et les deux autres, seulement dans la vapeur, comme on le voit dans la coupe de la chaudière, figurée en A. Ces thermomètres ont toujours marché d'accord. Pour corriger leurs indications de l'erreur provenant de la partie non plongée, M. Regnault prenait pour la température de cette partie, celle qui était donnée par un petit thermomètre suspendu entre les tiges. Cette méthode a donné les mêmes résultats que la précédente pour les températures communes.

Voici le tableau des résultats obtenus par M. Regnault jusqu'à 100° :

TEMPÉRATURE.	FORCE élastique.	TEMPÉRATURE.	FORCE élastique.	TEMPÉRATURE.	FORCE élastique.	TEMPÉRATURE.	FORCE élastique.
—32°	0mm,310	1°	4,940	34°	39,565	68°	213,596
—31	0,336	2	5,302	35	41,827	69	223,165
—30	0,365	3	5,687	36	44,201	70	233,093
—29	0,397	4	6,097	37	46,691	71	243,393
—28	0,431	5	6,534	38	49,302	72	254,073
—27	0,468	6	6,998	39	52,039	73	265,147
—26	0,509	7	7,492	40	54,906	74	276,624
—25	0,553	8	8,017	41	57,910	75	288,517
—24	0,602	9	8,574	42	61,055	76	300,838
—23	0,654	10	9,165	43	64,346	77	313,600
—22	0,711	11	9,792	44	67,790	78	326,811
—21	0,774	12	10,457	45	71,391	79	340,488
—20	0,841	13	11,162	46	75,158	80	354,643
—19	0,916	14	11,908	47	79,093	81	369,287
—18	0,996	15	12,699	48	83,204	82	384,435
—17	1,084	16	13,536	49	87,499	83	400,101
—16	1,179	17	14,421	50	91,982	84	416,298
—15	1,284	18	15,357	51	96,661	85	433,041
—14	1,398	19	16,346	52	101,543	86	450,344
—13	1,521	20	17,391	53	106,636	87	468,221
—12	1,656	21	18,495	54	111,945	88	486,687
—11	1,803	22	19,659	55	117,478	89	505,759
—10	1,963	23	20,888	56	123,244	90	525,450
—9	2,137	24	22,184	57	129,251	91	545,778
—8	2,327	25	23,550	58	135,505	92	566,757
—7	2,533	26	24,988	59	142,015	93	588,406
—6	2,758	27	26,505	60	148,791	94	610,740
—5	3,004	28	28,101	61	155,839	95	633,778
—4	3,271	29	29,782	62	163,170	96	657,535
—3	3,553	30	31,548	63	170,791	97	682,029
—2	3,879	31	33,406	64	178,714	98	707,280
—1	4,224	32	35,359	65	186,945	99	733,305
0	4,600	33	37,411	66	195,496	100	760,000
				67	204,376		

972. Expériences dans les hautes pressions. — Ces expériences ont été faites par le procédé qui précède, seulement l'appareil était de plus grandes dimensions, et susceptible d'une bien plus grande résistance[1]. La chaudière était celle qui est figurée à la page 253, seulement elle n'avait pas encore été percée en R. Le couvercle porte trois tubes de fer remplis d'huile de lin, dont deux reçoivent des thermomètres à mercure, que l'on a soin d'enfoncer de manière que le mercure ne dépasse qu'à peine le couvercle, et le troisième, plus gros que les autres et plongé seulement dans la vapeur, contient le réservoir d'un thermomètre à air (224). Le ballon B (*fig.* 708) est remplacé par un réservoir en cuivre très fort, de 280 litres de capacité, communiquant par sa partie inférieure avec la chaudière, au moyen d'un tube entouré d'un manchon dans lequel circule de l'eau froide. A sa partie supérieure est une tubulure d'où partent deux tuyaux, dont l'un communique avec une machine à comprimer l'air, et l'autre communique avec le manomètre à air libre qui avait déjà servi à M. Regnault, dans ses recherches sur la loi de Mariotte, et que l'on voit à gauche de la *fig.* 710, page 372.

Voici maintenant la manière générale d'opérer : l'eau de la chaudière étant près de bouillir, on comprimait de l'air dans le réservoir en cuivre, et au moyen de la pompe à eau P, on poussait le mercure dans le tube M (*fig.* 710), de manière que ce liquide arrivât dans le tube *nn'*, près d'un repère marqué à sa partie inférieure. Plusieurs expérimentateurs observaient ensuite avec une multitude de soins, les thermomètres, et les positions des niveaux du mercure dans les tubes M et *nn'*.

M. Regnault a pu opérer ainsi jusqu'à 28 atmosphères. A 30 atmosphères, la chaudière était tellement distendue, que le boulon qui réunissait les barres de l'armature à la partie inférieure se rompit. Il eût été imprudent d'aller au-delà. Nous donnons plus loin le tableau des principaux résultats.

973. Expériences de M. Magnus. — Nous citerons enfin les expériences de M. Magnus, faites au moyen d'un appareil de petites dimensions, susceptible de supporter des pressions supérieures à celles de l'atmosphère[2]. Cet appareil consiste en un tube U, dont une des branches terminée par une boule est remplie d'eau bien purgée d'air, que du mercure sépare de l'autre branche. Celle-ci communique avec une machine pneumatique ou une pompe à comprimer l'air. Le tube en U est plongé dans un bain, dont on fait varier la température. Un thermomètre à air, dont le réservoir bifurqué embrasse le tube en U, donne cette température. On commence, dans chaque expérience, par établir dans l'appareil une pression déterminée, mesurée sur un manomètre, et l'on observe la température indiquée par le thermomètre à air. M. Magnus a opéré ainsi jusqu'à 111°.

[1] *Mémoires de l'Académie des sciences de Paris*, t. XXI, p. 538.

[2] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XII, p. 69.

974. Constructions graphiques et formules d'interpolation. — La force élastique de la vapeur à saturation croît très rapidement avec la température. On n'a pu saisir jusqu'à présent la loi théorique qui lie ces deux quantités. Dalton avait proposé la loi suivante : *les tensions des vapeurs croissent suivant une progression géométrique lorsque les températures croissent en progression arithmétique.* Mais les expériences de M. Regnault montrent que cette loi n'est vraie qu'entre des limites de température assez rapprochées.

Il faut alors, pour saisir la marche du phénomène, employer la méthode graphique. C'est ce qu'a fait M. Regnault en représentant les températures par les abcisses, et en employant les précautions que nous avons déjà fait connaître (847). La courbe une fois tracée sur la planche de cuivre, on s'en sert pour trouver la valeur de la tension correspondant à une température donnée.

Formules d'interpolation. — Un moyen d'arriver à ce dernier résultat consiste à employer les formules d'interpolation ; on en a proposé un grand nombre. De Prony a adopté une expression de la forme $F = a\alpha^t + b\beta^t + c\gamma^t + \ldots$, et il a calculé les constantes au moyen des expériences de Bétancourt. Le Dr Yong a proposé la formule $F = (a + bt)^n$. Dulong et Arago ont représenté la force élastique F par l'expression $F = (1 + 0{,}7153t)^5$, dans laquelle t représente la température comptée positivement ou négativement à partir de 100°. La constante unique que renferme cette formule, a été déterminée au moyen de l'observation faite sous la plus forte pression. M. Regnault a trouvé que cette formule, qui a servi à calculer les résultats qui dépassent 24 atmosphères, dans le tableau de la page 361, représente bien les données de l'observation à partir de 100°, mais au-dessous, elle se trouve en défaut. M. Roche a proposé la formule $F = a\alpha^{\frac{t}{1+mt}}$, à laquelle il a été conduit par le calcul, et à laquelle sont aussi arrivés, de leur côté, MM. Clapeyron, August, de Wrede, Holtzmann. M. Regnault, auquel nous empruntons ces citations, a trouvé que cette formule, qui ne contient que trois constantes, représente les résultats qu'il a trouvés, avec une exactitude remarquable, dans une grande étendue de l'échelle thermométrique, et qu'elle s'applique aussi à la vapeur d'éther et à celle d'alcool. Enfin, de Prony a proposé l'expression

$$\log F = a + b\alpha^t + c\beta^t,$$

qui donne le logarithme de la force élastique, et a été appliqué, en 1844, par M. Biot, à la vapeur d'eau.

C'est cette formule que M. Regnault a adoptée; elle représente bien l'ensemble de toutes ses observations entre — 30° et 232°. Pour calculer les cinq constantes, il s'est servi des températures — 20°, 40°, 100°, 160°, 220°, et des tensions F correspondantes $0^{mm},91$; $54^{mm},91$; 760^{mm} ; $4651^{mm},6$; 17390^{mm}.

Le tableau suivant renferme une comparaison des nombres calculés par cette formule avec ceux que donne la construction graphique :

THERMOMÈTRE A AIR.	FORCES ÉLASTIQUES		DIFFÉRENCES.
	d'après la courbe.	par la formule.	
* — 20°	0mm,91	0mm,91	0mm,00
— 10	2,08	1,97	+ 0,11
0	4,60	4,48	+ 0,12
10	9,16	9,05	+ 0,11
20	17,39	17,30	+ 0,09
30	31,55	31,50	+ 0,05
* 40	54,91	54,91	0,00
50	91,98	92,02	— 0,04
60	148,79	148,83	— 0,04
70	233,09	233,11	— 0,02
80	354,64	354,64	0,00
90	525,45	525,45	0,00
* 100	760,00	760,00	0,00
110	1073,7	1075,36	— 1,66
120	1489	1491,28	— 2,28
130	2029	2030,28	— 1,28
140	2713	2717,63	— 4,63
150	3572	3581,23	— 9,23
* 160	4647	4651,62	— 4,62
170	5960	5961,66	— 1,66
180	7545	7546,39	— 1,39
190	9428	9442,70	— 14,70
200	11660	11689,00	— 29,00
210	14308	14324,80	— 16,80
* 220	17390	17390,36	— 0,36
230	20915	20926,38	— 11,38

975. Tension des vapeurs de divers liquides. — Dalton a proposé la loi suivante : *les tensions des vapeurs des divers liquides sont égales, à des températures également distantes de leurs points d'ébullition respectifs.* Si cette loi était exacte, elle permettrait de déduire les forces élastiques de la vapeur d'un liquide quelconque, de celles de la vapeur d'eau aux mêmes distances des points d'ébullition. Mais cette loi n'est pas exacte ; Dalton reconnaissait lui-même qu'elle n'était suffisamment approchée que pour les températures peu éloignées du point d'ébullition. M. Despretz a fait ressortir l'inexactitude de la loi, sur plusieurs liquides ; il a reconnu qu'elle est d'autant plus en défaut pour deux liquides, que ces liquides diffèrent plus par leur nature chimique ; et que les écarts sont dans le même sens au-dessus et au-dessous du point d'ébullition.

Des expériences directes étaient donc nécessaires, surtout sur les vapeurs de certains liquides, comme le chloroforme et l'éther, que l'on a cherché à employer dans les machines à vapeur. M. Regnault a enrichi la science d'un très grand nombre de résultats obtenus avec des liquides volatils à divers

degrés, des dissolutions de différents sels, et des liquides provenant de la condensation des gaz. Tantôt il a employé la méthode *statique*, au moyen de l'appareil (*fig.* 707), principalement pour les basses températures; tantôt la méthode de l'ébullition. Mais celle-ci ne donne des résultats exacts qu'autant que le liquide est bien pur, et que la cohésion moléculaire n'est pas trop grande; dans ce dernier cas, l'ébullition se fait avec des soubresauts, et la température oscille, ce qui rend le point d'ébullition incertain. Voici une partie des nombres trouvés par M. Regnault sur quelques-uns des liquides qu'il a étudiés ; ces résultats peuvent être représentés, comme pour la vapeur d'eau, par la formule empirique $\log F = a + b\alpha^t + c\beta^t$.

TEMPÉRATURES.	ALCOOL.	ETHER.	SULFURE de CARBONE.	CHLOROFORME.	BENZINE.	ESSENCE de TÉRÉBENTHINE
—20°	3mm,3	67mm,5	43mm,5	»	4mm,9	»
—10	6,6	113,3	81,0	»	13,4	»
0	12,8	183,3	132,0	»	26,6	2mm,1
+10	24,3	286,4	203,0	»	46,6	2,9
20	44,5	433,3	301,8	160mm,5	76,3	4,4
40	133,6	909,6	617,0	366,2	182,3	10,8
60	350,3	1728,5	1163,7	751,0	388,6	26,5
80	812,7	3024,4	2033,8	1404,6	756,6	61,3
100	1694,9	4950,8	3329,5	2426,5	1352'3	131,1
120	3219,7	7702,2	5145,4	3916,2	2256,3	257,2
140	5637,0	»	7556,9	5965,7	3537,0	464,0
150	7258,7	»	»	7226,49	4336,7	605,2

GAZ LIQUÉFIÉS.				MERCURE.			
TEMPÉRATURES.	ACIDE sulfureux.	AMMONIAQUE.	ACIDE sulfhydrique.	TEMPÉRATURES.	TENSION.	TEMPÉRATURES.	TENSION.
—78,2	»	157mm,9	441mm,4	0°	0mm,0200	120°	1mm,534
—40	»	528,6	»	10	0,0268	150	4,266
—30	»	876,6	2808,6	20	0,0372	180	11,00
—20	479,5	1397,7	4273,0	30	0,0530	200	19,90
—10	762,5	2149,5	5945,0	40	0,0767	250	75,75
0	1165,1	3162,9	7709,3	50	0,1120	300	242,1
+10	1719,5	4612,2	»	60	0,1643	350	663,2
20	2462,0	6467,0	»	70	0,2410	400	1587,9
30	3431,8	8832,2	»	80	0,3528	450	3384,3
40	4670,2	11776,4	»	90	0,5142	500	6520,2
50	6220,0	»	»	100	0,7455	520	8264,9

976. Tension des vapeurs des liquides mélangés et des dissolutions salines. — Dalton, qui a découvert la plupart des lois relatives aux vapeurs, avait admis que la tension donnée par des liquides mélangés, était égale à la somme des tensions que chacun d'eux produirait isolément à la même température. Cette loi, admise généralement, n'avait jamais été vérifiée dans le cas où il y a saturation. M. Regnault a fait des expériences pour la contrôler, au moyen de l'appareil (*fig.* 707), en remplissant l'ampoule de deux liquides différents. Voici les résultats auxquels il est arrivé :

1° Quand les deux liquides n'exercent pas d'action dissolvante l'un sur l'autre, comme l'eau et le *sulfure de carbone*, ou le *chlorure de carbone* C^2Cl^6, ou la *benzine*, la loi est exacte, ou du moins les erreurs sont négligeables. — 2° Avec l'eau et l'éther, qui se dissolvent en proportions non illimitées, les tensions sont bien moindres que la somme des tensions des liquides isolés ; la somme représente à peine celle de l'éther seul. — 3° Quand les deux substances se dissolvent mutuellement en toutes proportions, la loi n'est pas plus exacte. Des mélanges en plusieurs proportions d'éther et de sulfure de carbone, de benzine et d'alcool, ont donné des tensions intermédiaires entre celles des deux liquides isolés.

M. Regnault et M. Wülner ont mesuré les tensions des vapeurs fournies par les dissolutions de divers sels dans l'eau : le premier employait l'appareil (*fig.* 707) ; M. Wülner a suivi la méthode de M. Magnus (973), et il a procédé en comparant les tensions fournies par la dissolution, avec celles de la vapeur d'eau pure aux mêmes températures. Il a constaté d'abord que *la diminution de la tension, produite par la présence du sel, est proportionnelle à la quantité dissoute dans un même poids d'eau*. Pour une même quantité de sel, la différence augmente avec la température, et par conséquent avec la tension de la vapeur de l'eau pure. Pour le *sel marin* et le *sulfate de soude*, la différence d est proportionnelle à la tension de la vapeur d'eau pure ; de sorte qu'on a $d=af$. Pour l'*azotate de soude*, le *chlorure de potassium*, le *sulfate de potasse* et l'*azotate de potasse*, les résultats sont représentés par une expression de la forme $d=af+bf^2$.

II. Mesure de la chaleur latente des vapeurs.

977. Mesure de la chaleur latente de la vapeur d'eau. — Black, après avoir découvert la chaleur latente de vaporisation, fit quelques expériences pour la mesurer. Il plaça sur un poêle, dont la température était sensiblement constante, un vase plein d'eau, et compara le temps qu'il mettait à s'échauffer jusqu'à 100°, à celui qu'employait ensuite l'eau pour se transformer complètement en vapeur. Il porta aussi de l'eau au-dessus de 100° dans une marmite de Papin, puis il ouvrit subitement la soupape ; la vapeur s'échappa avec

force, et la température retomba à 100°. L'eau vaporisée avait enlevé, à l'état latent, toute la chaleur perdue par l'eau qui restait. Watt a employé le même moyen ; il a aussi procédé en faisant arriver la vapeur formée dans une bouilloire, au milieu d'une masse connue d'eau, qui s'échauffait aux dépens de la chaleur latente abandonnée par la vapeur condensée, et de celle que cédait l'eau de condensation pour s'abaisser à la température finale du mélange. Le poids de vapeur condensée était égal à l'augmentation de poids de l'eau employée.

Rumfort utilisait, dans le même but, son calorimètre à serpentin, qui a été adopté, avec des modifications, par la plupart des physiciens qui sont venus après lui. La *fig.* 709 représente l'appareil tel qu'on l'emploie ordinairement : la vapeur se produit dans une cornue R, dont le col incliné communique avec le serpentin du calorimètre. Le liquide, qui se condense dans le col incliné, retombe dans la cornue. Le calorimètre est soutenu sur trois pointes en bois, et muni d'un couvercle pour empêcher l'évaporation; sa température est donnée par le thermomètre t, pendant qu'on fait mouvoir l'agitateur a. L'eau fournie par la vapeur condensée dans le serpentin, se rend dans un vase c complétement fermé, où elle prend la température du calorimètre. A la fin de l'expérience, on la retire par le robinet inférieur et on la pèse; on a ainsi le poids de la vapeur qui a traversé l'appareil. On peut opérer sous différentes pressions en condensant ou raréfiant l'air par le robinet r. Soient P le poids de l'eau du calorimètre et de son équivalent en eau, t sa température initiale, T celle de la vapeur, déduite de la tension qui règne dans l'appareil ; θ la température finale, p le poids de la vapeur condensée, et enfin c la chaleur spécifique du liquide sur lequel on opère. On aura, pour déterminer la chaleur latente de la vapeur,

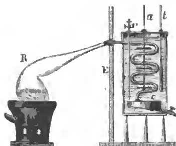


Fig. 709.

$$pl + p\,(T - \theta) = P\,(\theta - t), \qquad [1]$$

qui exprime que la quantité de chaleur pl cédée par le poids p de vapeur pour se liquéfier, plus la quantité $pc\,(T - \theta)$ abandonnée par le liquide condensé, est égale à la quantité de chaleur gagnée par le calorimètre.

Pour éviter la perte de chaleur extérieure, on commence l'opération à quelques degrés au-dessous de la température ambiante, et on la termine quand le calorimètre arrive à un même nombre de degrés au-dessus.

Il existe deux autres causes d'erreur : la première provient de l'eau entraînée par la vapeur à l'état de gouttelettes, et qui, s'ajoutant au poids de la vapeur, rend le résultat trop faible. On peut reconnaître qu'il y a de l'eau entraînée,

en employant de l'eau salée; on trouve un peu de sel dans le vase *c*. On atténue cette cause d'erreur en évitant de produire une ébullition trop vive. La seconde cause d'erreur est due à la chaleur communiquée au serpentin, en vertu de la conductibilité du col de la cornue.

M. Despretz a trouvé, par la méthode qui précède, qu'il faut 540 calories à 1 gramme d'eau pour passer à l'état de vapeur. Ce même nombre a été retrouvé par M. Brix, au moyen d'un appareil analogue, dans lequel le serpentin était remplacé par un vase annulaire. Ce nombre diffère peu de celui qu'a trouvé M. Regnault pour la température de 100°, au moyen des appareils que nous allons décrire.

978. De la chaleur latente de la vapeur d'eau sous différentes pressions. — Dans les expériences qui précèdent, la chaleur latente n'est mesurée que sous des pressions peu différentes de 760^{mm}. Il est important, pour l'emploi que l'on fait de la vapeur comme force motrice, de savoir si la chaleur latente reste la même à toutes les températures. Watt admettait qu'elle diminue à mesure que la température augmente, de manière que *la quantité de chaleur nécessaire pour échauffer et transformer en vapeur* 1^{gr} *d'eau à partir de* 0° *est toujours la même*. Cette loi, connue sous le nom de *loi de Watt*, n'a été établie que par une seule expérience assez imparfaite. En 1803, Southern et Creighton conclurent d'expériences nombreuses que *la chaleur latente de vaporisation est la même sous toutes les pressions* : c'est la loi de Southern. Clément et Désormes, en 1819, ont trouvé qu'un calorimètre dans lequel ils condensaient des poids égaux de vapeur, s'échauffait de la même quantité, quelle que fût la pression de la vapeur; ce qui est d'accord avec la loi de Watt. Mais dans ces expériences, la vapeur, à son entrée dans le calorimètre, se dilatait énormément en reprenant la pression atmosphérique; d'où il devait résulter un refroidissement considérable. M. de Pambour, en expérimentant de 2,7 à 4,4 atmosphères, a aussi retrouvé la loi de Watt. Mais M. Despretz a reconnu que les lois de Watt et de Southern sont l'une et l'autre inexactes, et il a avancé le premier, que la chaleur totale croît avec la température et moins vite que celle-ci[1].

979. Expériences de M. Regnault. — M. Regnault a repris la question par une méthode et des appareils perfectionnés, au moyen desquels il a pu éviter les causes d'erreur qu'il a remarquées dans les expériences antérieures. L'appareil est représenté dans la *fig.* 638 : D, D' sont deux calorimètres identiques en cuivre rouge, contenant de l'eau qu'on agite régulièrement au moyen d'agitateurs *a* qui marchent ensemble. La vapeur arrive aux deux calorimètres par le tuyau *v*, qui part de la chaudière V, et par le robinet de distribution *r*. Chaque calorimètre contient deux ballons en cuivre dans lesquels la vapeur se condense, et un serpentin qui part du ballon inférieur et communique, par les

[1] *Traité élémentaire de physique*, par M. C. Despretz (1836), p. 212.

tubes *c*, *c'*, *p*, avec un réservoir en tôle R, de 600 litres de capacité, plongé dans l'eau. Une pompe foulante comprime dans ce réservoir, par le tube *f*, de l'air qui sert à établir une pression déterminée dans tout l'appareil. Cette pression est mesurée par le manomètre à air libre M*nn'*, dont nous avons plusieurs fois parlé (972). Une partie de la vapeur qui vient de la chaudière se rend dans le condenseur C, où elle se liquéfie. Ce condenseur est un vase en tôle de 60 litres de capacité, mis en communication par le tube *m'* avec le réservoir à air comprimé R. L'eau se renouvelle continuellement autour du condenseur; elle vient d'un bassin *s*, et passe d'abord dans un manchon T qui entoure le bas du tube *m'*, pour liquéfier la vapeur qui n'aurait pas été condensée en C, puis cette eau arrive par le tube *t'* au fond de la cuve qui contient le condenseur; l'eau échauffée s'échappe par un trop-plein. Le tube à niveau *h* indique, par la quantité d'eau condensée, la marche que suit la distillation. Le tube à robinet *t* sert à extraire cette eau condensée.

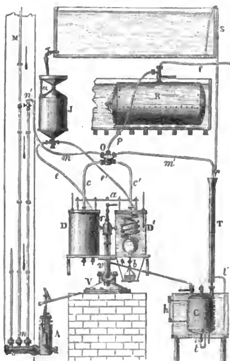


Fig. 710.

La chaudière V porte à son couvercle, des tubes de fer contenant des thermomètres; elle a une capacité de 300 litres environ, et est à moitié remplie d'eau. La vapeur en sort par un tube qui, prenant naissance au-dessus du niveau, circule sous forme de serpentin dans l'intérieur de l'eau, et vient aboutir au robinet de distribution *r*. La partie de ce tuyau, qui est hors de la chaudière, *o* (*fig.* 711), est entourée d'un manchon dont on voit la coupe en *mn*, et dans lequel circule la vapeur. Cette vapeur se rend directement par le tube *t* dans le condenseur C (*fig.* 710). De cette façon, la vapeur ne se refroidit pas dans son trajet et ne peut pas emporter de gouttelettes d'eau.

[1] *Mémoires de l'Institut* (Académie des sciences), t. XXI, p. 635.

La *fig.* 711 représente la coupe du robinet distributeur; en $r'T'$, par un plan vertical passant par l'axe du tube *o*, et en *r*T par un plan perpendiculaire au premier. Ce robinet est composé d'une boîte en bronze, coulée d'une seule pièce, dans laquelle est ménagée une enveloppe un peu conique. Cette enveloppe sert de boisseau à un robinet creux, que l'on fait tourner au moyen de la tige rr', qui passe à travers un presse-étoupe. Les tubes *c*, *c'* qui aboutissent aux calorimètres D, D' (*fig.* 710), arrivent jusqu'au robinet, qui présente une ouverture, par laquelle la communication peut être établie entre le boisseau et l'un ou l'autre calorimètre.

La vapeur arrive, par le tube *o* (*fig.* 711), dans l'espace annulaire qui entoure le robinet, et se rend en partie par le tube T' dans le condenseur C (*fig.* 710), et en partie dans un des calorimètres par le robinet *r*. En réglant la position de ce robinet et celle du robinet du condenseur C, on fait varier à volonté la proportion de vapeur qui entre dans le calorimètre.

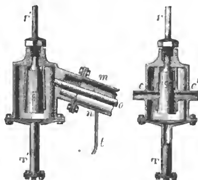


Fig. 711.

Voici maintenant comment on opère : on commence par remplir les calorimètres d'un même poids d'eau. Cela se fait au moyen d'un vase jaugeur J, dans lequel on introduit un volume d'eau connu, en arrêtant le niveau à un repère tracé sur le tube latéral α. Au moyen de ce volume, qui est de 66 litres environ, on calcule le poids de l'eau, en tenant compte de sa dilatation et de celle du vase J, dont la capacité à 0° est connue. Le liquide est ensuite introduit dans l'un ou l'autre des calorimètres, par le robinet inférieur du vase J, robinet dont le canal est coudé à angle droit.

Après avoir porté à l'ébullition l'eau de la chaudière, et avoir établi dans l'appareil la pression désirée, on fait passer la vapeur dans le condenseur C (*fig.* 710), et quand la distillation est régulière, on en dirige une partie dans l'un des calorimètres, D'. On observe alors, au moyen de lunettes glissant sur des supports fixes, la marche des thermomètres des deux calorimètres, pendant qu'on agite l'eau qu'ils contiennent. Ces thermomètres sont enfoncés de manière que le mercure ne dépasse que très peu le couvercle. Quand le thermomètre est devenu stationnaire en D', on recueille l'eau condensée par le serpentin, dans un ballon en verre *b*, qui contient un petit thermomètre très sensible; puis on pèse cette eau. Pour calculer la chaleur latente, il faut connaître la température de la vapeur à son entrée; on la déduit de sa force élastique donnée par le manomètre à air libre M. On opère ensuite avec l'autre calorimètre, de la même

manière qu'avec le premier, et ainsi de suite alternativement, et l'on prend la moyenne des résultats ainsi obtenus.

La correction relative à l'action du milieu ambiant sur le calorimètre qui fonctionne, et à la chaleur qu'il reçoit par conductibilité, du robinet *r*, se calcule au moyen des observations faites simultanément sur l'autre calorimètre, qui ne reçoit pas de vapeur, et qui se trouve *soumis aux mêmes causes de perturbations extérieures*.

M. Regnault a mesuré ainsi la chaleur latente de la vapeur d'eau jusqu'à 14 atmosphères de pression. En dilatant l'air dans le réservoir R, au lieu de le comprimer, il a pu aussi opérer au-dessous de la pression atmosphérique, jusqu'à $\frac{1}{5}$ d'atmosphère. Il n'a pu aller au-dessous, l'ébullition se faisant alors très irrégulièrement dans la chaudière.

Expériences sous de faibles pressions. — Pour les faibles pressions, M. Regnault a employé un autre procédé qui consiste à mesurer la quantité de chaleur enlevée à un poids connu d'eau, par l'évaporation d'un poids aussi connu du même liquide. L'appareil destiné à ces expériences est formé d'un récipient annulaire dans lequel on met 5^{gr} d'eau distillée, et que l'on plonge ensuite dans un calorimètre. Ce récipient communique avec un flacon entouré d'un mélange réfrigérant, et dont on peut extraire une partie de l'air au moyen d'une machine pneumatique. Après avoir établi la pression sous laquelle on veut opérer, pression mesurée au moyen d'un manomètre barométrique (879), on suit la marche du thermomètre du calorimètre. L'eau du récipient distille et vient se condenser dans le flacon refroidi. Quand tout est évaporé, ce que l'on reconnaît au point d'arrêt qui se manifeste brusquement sur le thermomètre, on calcule, d'après l'abaissement de température du calorimètre, la quantité de chaleur enlevée par l'eau du récipient en s'évaporant.

M. Pouillet a aussi mesuré, de son côté, au moyen d'un appareil particulier, les chaleurs latentes de la vapeur d'eau sous de faibles pressions. Il existe un accord assez satisfaisant entre ses résultats et ceux de M. Regnault.

Conclusion. — M. Regnault a conclu des nombreux résultats qu'il a obtenus, que la loi de Watt n'est pas exacte, et que celle de Southern l'est encore moins : les chaleurs totales vont en augmentant, et les chaleurs latentes en diminuant quand la température augmente. M. Regnault a renfermé les résultats de ses expériences dans la formule

$$[2] \qquad \lambda = 606,5 + 0,305\,t, \qquad \text{ou} \quad \lambda = 0,305\,(1988,5 + t),$$

dans laquelle λ est la chaleur totale, c'est-à-dire la chaleur latente augmentée de la température t de la vapeur. Ainsi, à 100°, on a $\lambda = 637$, et par conséquent la chaleur latente est 537. A 0°, la chaleur totale est égale à la chaleur latente, et elle a pour valeur 606,5. On voit que la chaleur totale est égale à

la chaleur latente à 0°, augmentée de la température d'ébullition multipliée par le nombre 0,305. Ce nombre exprime la quantité de chaleur qu'il faut fournir à 1gr de vapeur saturée, pour élever sa température de 1°, en la maintenant saturée au moyen de la compression.

On voit aussi que la chaleur latente diminue avec la température t, car on a

$$\lambda - t = 606{,}5 - 0{,}695\, t.$$

Conséquences. — M. Legrand a donné une interprétation simple des résultats obtenus par M. Regnault. Il fait remarquer d'abord qu'en établissant la formule [1] (977) d'où l'on déduit la valeur de la chaleur latente, on suppose tacitement que la vapeur qui se condense possède la même chaleur spécifique que le liquide produit. Or, la chaleur spécifique augmente au moment de la condensation. L'échauffement du calorimètre est donc trop faible, une partie de la chaleur latente abandonnée étant retenue par le liquide dont la capacité est plus grande que celle de la vapeur. Pour avoir égard à cette circonstance, M. Legrand procède de la manière suivante : P, t, θ, c, T, p, représentent les mêmes quantités que dans la formule [1], et v étant la capacité calorifique de la vapeur, que l'on suppose formée par du liquide de l'espèce de celui qui remplit le calorimètre, ce liquide, après la condensation, aura pour masse $P+p$, et contiendra, en partant de la température de 0°, une quantité de chaleur égale à $(P+p)\,c\theta$. Cette quantité se compose de celle qui existait d'abord, Pct; plus de la chaleur libre de la vapeur à partir du même point, $pv\mathrm{T}$; plus enfin de la chaleur latente lp abandonnée pendant la liquéfaction ; on aura donc

$$[3] \quad pv\mathrm{T} + pl + Pct = (P+p)\,c\theta; \quad \text{d'où} \quad l = \frac{P-p}{p}(\theta - t) - v\mathrm{T} + c\theta.$$

En ajoutant $v\mathrm{T}$, on aura la chaleur totale $l + v\mathrm{T}$. Dans la formule donnée par la méthode ordinaire, $v\mathrm{T}$ serait remplacé par $c\mathrm{T}$, et les formules qui donnent les chaleurs totales coïncident. M. Legrand a appliqué la formule [3] aux résultats trouvés par M. Regnault, ou à la formule $\lambda = 606{,}5 + 0{,}305\, t$, qui les représente. Pour avoir la chaleur latente, il faut retrancher de la chaleur totale λ, la quantité $v\mathrm{T}$, ou $0{,}305\, t$, ce qui donne $l = \lambda - c\mathrm{T} = 606{,}5$; ce qui montre que *la chaleur latente, calculée comme il vient d'être dit, est constante*. C'est l'énoncé de la loi de Southern ; mais au fond la loi est différente, la chaleur latente de la vapeur étant prise en considération. Ce résultat est d'une grande simplicité ; mais il faudrait voir s'il s'applique aux autres liquides. M. Legrand remarque enfin que le chiffre de la chaleur latente ainsi évalué dépend du point de départ adopté pour compter les températures.

Voici les résultats trouvés par M. Regnault :

TEMPÉRATURE.	TENSION en millimètres.	CHALEUR totale.	TEMPÉRATURE.	TENSION en atmosphères.	CHALEUR totale.
0°	4mm,60	606,5	120°	1 atm.,962	643,1
10	9,16	609,5	130	2,671	646,1
20	17,39	612,6	140	3,576	649,2
30	31,55	615,7	150	4,712	652,2
40	54,91	618,7	160	6,120	655,3
50	91,98	621,7	170	7,644	658,3
60	148,79	624,8	180	9,929	661,4
70	233,09	627,8	190	12,425	664,4
80	354,64	630,9	200	15,380	667,5
90	525,45	633,9	210	18,848	670,5
100	760,00	637,0	220	22,882	673,6
110	1075,37	640,0	230	27,535	676,6

980. Chaleurs latentes des liquides autres que l'eau. — M. Despretz a déterminé, par le moyen que nous avons décrit (978), la chaleur latente d'élasticité de l'*alcool*, de l'*éther* et de l'*essence de térébenthine*. Il a trouvé les nombres 331,9, 174,5 et 166,2. Il a remarqué que les liquides dont les vapeurs ont la plus forte densité, sont ceux qui exigent le moins de chaleur pour se volatiliser. Des essais tentés sur le sulfure de carbone et la vapeur d'iode ont conduit à la même conséquence. M. Brix a aussi expérimenté sur divers liquides.

Calorimètre à mercure. — MM. Favre et Silbermann, dans un grand travail sur la chaleur dégagée dans les actions chimiques, ont employé un appareil qui leur a servi aussi à mesurer la chaleur latente d'élasticité de divers liquides. Cet appareil n'est autre chose qu'un thermomètre à mercure, dont le réservoir même sert de calorimètre. Le réservoir (*fig.* 712) est un ballon en verre de 1 litre environ de capacité ; à une ouverture latérale est ajustée une éprouvette en platine *m*, fixée par du mastic de fontainier fondu avec de la glu marine, et maintenue contre la poussée du mercure par un arc-boutant en verre. Du côté opposé, le ballon porte un bec dans lequel s'ajuste le tube *rr*, divisé en parties d'égale capacité. Pour remplir le réservoir de mercure, on le met sous un récipient tubulé dans lequel on fait le vide, et l'on y fait tomber du mercure par la tubulure, au moyen d'un entonnoir à long bec effilé. Un piston plongeur en acier, *p*, sert à chasser le mercure dans le tube *rr*. Le réservoir repose sur les bords circulaires d'une cavité pratiquée dans un morceau de liége ; il est contenu dans une caisse en bois et entouré de ouate ou de duvet de cygne.

Ce calorimètre se gradue en cherchant directement les déplacements de

l'extrémité de la colonne de mercure dans le tube *rr*, occasionnés par l'introduction d'un certain nombre de *calories* dans le réservoir, et non par une élévation donnée de température; ce qui rend les observations indépendantes de toutes corrections relatives à la masse et aux capacités calorifiques des différentes parties de l'appareil. Pour faire cette graduation, on introduit dans le tube *m* un poids connu d'eau à 100° dont on prend la température finale. L'abaissement de température de cette eau indique le nombre *n* de calories cédées au mercure, et l'espace parcouru par l'extrémité de la colonne de mercure dans le tube *rr*, divisé par *n*, donne en millimètres la valeur d'une calorie.

Pour introduire un liquide à une température connue, dans le tube *m*, on emploie une pipette recourbée *cn* (*fig.* 712); on y fait bouillir le liquide, puis

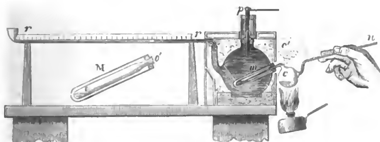


Fig. 712.

on introduit le bec de la pipette dans le tube *m*, représenté à part en M, ou mieux dans un tube de verre mince *oo'*, contenu dans le tube, et entouré de mercure. On retourne ensuite la pipette dans la position *c'*, et le liquide est chassé par la vapeur dans le tube *oo'*. Quand il n'en reste que peu dans la pipette, on ôte le bouchon *n* qui ferme l'extrémité du tube qui lui sert de manche, pour qu'il ne passe pas de vapeur dans le calorimètre. Le poids du liquide introduit s'obtient en pesant le tube *oo'*.

Pour appliquer cet appareil à la mesure de la chaleur latente d'un liquide, il suffit de le faire passer à l'état de vapeur dans le tube *oo'*, en laissant la pipette dans la position *c*. Le poids et la température finale du liquide condensé dans ce tube étant connus, ainsi que sa chaleur spécifique, on conclut du nombre de calories gagnées par le calorimètre, la chaleur latente de la vapeur.

Cet appareil ingénieux est susceptible de donner des résultats exacts. Il est facile de voir comment on peut l'employer à la mesure des capacités calorifiques des liquides, capacités qu'il faut connaître pour trouver leur chaleur latente de vaporisation : on opère alors de la même manière que pour graduer le calorimètre au moyen de l'eau bouillante.

Voici quelques-uns des résultats trouvés par MM. Favre et Silbermann :

LIQUIDES.	TEMPÉRATURE d'ébullition.	CAPACITÉS.	CHALEURS latentes.
Eau	100°	1	535,77
Bicarbure d'hydrogène	200 à 210°	0,494	59,91
Esprit de bois	66°,5	0,671	263,8
Alcool vinique	78	0,644	208,9
Alcool amylique	»	0,587	121,3
Alcool éthalique	»	0,506	58,5
Éther sulfurique	38	0,503	91,1
Éther acétique	74	0,483	105,8
Butyrate de méthylène	93	0,492	87,3
Essence de térébenthine	157	»	69

981. Applications de la chaleur latente de la vapeur d'eau. — Un gramme d'eau exige 537 calories pour se vaporiser à 100°, et la vapeur formée cède cette même quantité de chaleur pour se condenser. Il résulte de là qu'en transportant la vapeur par des tuyaux, dans des vases où on la condense, on transporte au loin la chaleur qu'on a fournie pour la produire. C'est sur ce principe qu'est fondé le chauffage par la vapeur.

Le système d'appareils destiné à chauffer les différentes parties d'un édifice par ce moyen, se compose : 1° d'une chaudière à vapeur, disposée comme celle des machines à vapeur ; 2° de tuyaux dans lesquels doit circuler la vapeur ; 3° de récipients à grande surface destinés à la condenser, et à transporter au dehors la chaleur qu'elle abandonne. On donne aux tuyaux une pente convenable pour que l'eau qui s'y condense revienne à la chaudière. Il faut éviter surtout que ces tuyaux présentent des courbures en forme de siphon renversé ; car l'eau s'y accumulerait, et le tuyau serait obstrué. A la partie supérieure sont des robinets ou *souffleurs*, destinés à laisser échapper l'air, quand on met l'appareil en train. Le palais de la Bourse, à Paris, et celui de l'Institut, sont chauffés avec des appareils à vapeur qui peuvent être cités comme des modèles de ce genre de chauffage.

On emploie souvent la vapeur, dans différentes industries, pour chauffer de grandes masses liquides avec un seul foyer. Tantôt la vapeur traverse un serpentin métallique qui parcourt les différentes parties de ce liquide, qui peut alors être renfermé dans des vases de bois ; tantôt elle circule dans une double enveloppe, autour de la surface extérieure des vases métalliques. Indépendamment de la facilité de pouvoir chauffer plus régulièrement que par tout autre moyen, et de distribuer à volonté dans plusieurs appareils la chaleur produite par un seul foyer, on trouve encore dans ce système, l'avantage d'être sûr que la température ne dépasse pas celle qu'on donne à la vapeur.

III. Mesure de la densité des vapeurs.

982. Méthode de Gay-Lussac. — Nous avons vu (888) combien il est important pour les usages de la chimie de connaître la densité des corps à l'état gazeux. Quand les substances ne se présentent pas naturellement à cet état, il faut se servir de la densité de leur vapeur. Gay-Lussac a procédé en renversant le problème : au lieu de chercher le poids d'un volume donné de vapeur, il a cherché, de la manière suivante, le volume occupé par un poids connu : une éprouvette graduée *c* (*fig.* 713) remplie de mercure sec, est renversée dans une chaudière remplie du même liquide. On connaît le volume qui correspond à chaque division. On y fait passer une petite ampoule de verre *a*, pleine de liquide purgé d'air par l'ébullition et pesé avec soin. L'ampoule se rend à la partie supérieure de l'éprouvette, qu'on entoure alors d'un manchon en verre *m*, que l'on enfonce dans le mercure de la chaudière, et qu'on remplit d'eau ou d'huile. On échauffe la chaudière, la chaleur se transmet dans toutes les parties de l'appareil, et l'ampoule est brisée par la dilatation du liquide qu'elle contient ; alors la tension de la vapeur produite fait baisser le mercure dans l'éprouvette. On attend que tout le liquide soit réduit en vapeur ; ce que l'on reconnaît en ce que la surface du mercure n'est plus mouillée, ou mieux en ce que la tension de la vapeur est moindre que le maximum qui correspond à la température. Cette tension se mesure en retranchant de la hauteur du baromètre, la colonne de mercure ramenée à zéro, qui s'élève dans l'éprouvette. On mesure cette colonne au moyen de la pointe *i*, qu'on amène successivement dans le plan du niveau du mercure dans l'éprouvette et dans la chaudière. Il serait plus exact d'employer le cathétomètre, en s'aidant d'une pointe à vis qui viendrait affleurer le niveau de la cuvette. La température est donnée par plusieurs thermomètres *t*, *t'*, placés à différentes hauteurs dans le manchon, dont on agite le liquide. Quand cette température est fixe, on observe, sur la division de l'éprouvette, le volume occupé par la vapeur. Soit *v* le volume donné par la division ; le volume réel est $v\,(1+\mathrm{KT})$, T étant la température et K le coefficient de dilatation du verre. Ce volume est celui d'un poids connu de vapeur à la température *t* et sous la pression *h* ; en le divisant par le poids $p' = v\,(1+\mathrm{KT})\,1^{gr},3\,\frac{273}{273+t}\,\frac{h}{760}$ d'un même volume d'air sous la même pression et à la même température, on obtient la densité de la vapeur par rapport à l'air.

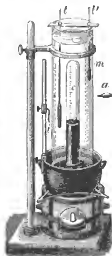


Fig. 713.

M. Despretz a aussi mesuré la densité de la vapeur de divers liquides, au moyen d'un tube barométrique portant à sa partie supérieure un robinet, auquel il adaptait un ballon vide. Le liquide introduit dans l'appareil formait de la vapeur dont on mesurait la pression. En la comparant à celle d'un baromètre à vapeur contenant un excès de liquide, on pouvait reconnaître si, dans le tube surmonté du ballon, tout le liquide était réduit en vapeur. On pesait ensuite le ballon, et on comparait son poids à celui du même ballon vide, dont la capacité avait été déterminée d'avance. On pouvait obtenir ainsi le poids d'un volume connu de vapeur sous une pression et à une température données.

983. Méthode de M. Dumas. — La méthode de Gay-Lussac ne peut pas être employée quand la température nécessaire pour transformer le corps en vapeur est trop élevée, car l'huile que contient le manchon se décompose et perd sa transparence. La méthode de M. Dumas permet d'opérer à des températures élevées; elle consiste à remplir de vapeur un ballon dont la capacité est connue, et à mesurer le poids de cette vapeur, poids que l'on divise ensuite par celui d'un même volume d'air dans les mêmes circonstances. Le ballon dont on se sert, B (*fig.* 714), présente une longue pointe effilée à la lampe. Après l'avoir bien lavé et bien desséché, on y introduit une certaine quantité de la substance dont on veut étudier la vapeur. On plonge ensuite ce ballon dans un bain destiné à élever sa température, et on l'y maintient. On forme ce bain avec de l'eau, des dissolutions salines, de l'huile, ou des alliages plus ou moins fusibles, suivant la température à laquelle on veut porter le ballon. Un thermomètre à poids t, ou un thermomètre à air, donne la température du bain. La substance forme bientôt de la vapeur qui sort par la pointe effilée, sous l'apparence d'un petit nuage, dont on surveille la marche. Tout l'air est entraîné hors du ballon, et bientôt on voit cesser la sortie de la vapeur; ce qui indique qu'il ne reste plus de substance à vaporiser, et que le ballon est rempli de vapeur sous la pression atmosphérique P, et à la température du bain T. On attend que cette température devienne stationnaire, ce que l'on obtient en fermant les ouvertures du fourneau, ou en retirant le feu lorsque la température est encore un peu au-dessous de celle que l'on veut atteindre; alors les variations sont très lentes, et bientôt il s'établit un état stationnaire. On ferme alors au chalumeau la pointe effilée. Le ballon étant refroidi, on le pèse, et l'on conclut du résultat, le poids de la vapeur qui le remplissait sous la pression P et à la température T. Le volume de ce poids de vapeur était, à cette température, égal à $V(1+KT)$, en désignant par V le volume du ballon à 0°, et par K le coefficient de dilatation du verre. Le calcul se fait, du reste, comme pour mesurer la densité d'un gaz dans un flacon non muni d'un robinet (876).

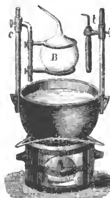


Fig. 714.

Comme il pourrait rester un peu d'air dans le ballon, il est bon, à la fin de l'expérience, de briser sa pointe sur le mercure. Ce liquide s'introduit dans le ballon, et l'on reconnaît facilement s'il y restait un peu d'air. S'il en était ainsi, on transvaserait cet air sous le mercure, dans une éprouvette graduée, et l'on mesurerait son volume, ainsi que la température et la pression correspondantes ; d'où l'on conclurait son poids, qui devrait être retranché de celui de la vapeur.

Quand la température doit être portée au-delà de 400°, cette méthode présente de grandes difficultés. M. Mitscherlich a alors imaginé de procéder de la manière suivante : la vapeur est contenue dans un gros tube de verre effilé, placé à côté d'un tube tout semblable rempli d'air, et servant de pyromètre. Les deux tubes sont renfermés dans une double enveloppe en tôle, contenue elle-même dans un manchon en fonte placé horizontalement dans un fourneau. Le manchon est soutenu par deux tourillons fixés au milieu de ses bases, de manière qu'on peut lui imprimer un mouvement de rotation sur lui-même, pour rendre la température bien uniforme dans toutes ses parties. Quand la vapeur cesse de s'échapper du tube qui la contient, on ferme les pointes effilées des deux tubes; et on achève l'opération comme il a été dit ci-dessus. Le tube à air sert à trouver la température qui existait au moment où on l'a fermé.

Voici quelques-uns des résultats obtenus par Gay-Lussac et par M. Dumas.

SUBSTANCES.	DENSITÉ des vapeurs.	POINT d'ébullition.	
Eau	0,6235	100	D'après Gay-Lussac.
Acide cyanhydrique	0,9476	26,50	
Alcool	1,6138	11	
Ether chlorhydrique	2,219	36	
Ether sulfurique	2,5860	36	
Sulfure de carbone	2,6447	47	
Essence de térébenthine	5,0130	157	
Ether iodhydrique	5,4749	65	
		Poids d'un litre	
Vapeur d'iode	8,716	11gr,323	D'après M. Dumas.
Vapeur de soufre	6,55	8,489	
Vapeur de mercure	6,976	9,0625	
Vapeur de phosphore	4,32	»	
Protochlorure de phosphore	4,875	6,3532	
Hydrogène arséniqué	2,695	3,5023	
Protochlorure d'arsénic	6,3006	8,1852	
Chlorure de silicium	5,939	7,7154	
Acide fluorique silicé	3,600	»	
Chlorure de bore	2,942	5,1212	
Acide fluoborique	2,3124	»	
Perchlorure d'étain	9,1997	11,9514	
Perchlorure de titane	6,836	8,881	

984. Densités de la vapeur d'eau sous différentes pressions. — La méthode de Gay-Lussac donne la densité de la vapeur au-dessous de la tension maximum; celle de M. Dumas la donne à l'état de saturation. Si l'on veut passer des nombres ainsi obtenus, ou bien de la densité théorique, à la densité à une température et sous une pression différentes de celles qui correspondent au nombre obtenu, on a coutume d'employer la même méthode que pour les gaz proprement dits, c'est-à-dire d'appliquer la loi de Mariotte et celles des dilatations des gaz, et alors la densité d'une vapeur par rapport à l'air pris dans les mêmes conditions est regardée comme constante, quelle que soit la température, pourvu qu'il n'y ait pas saturation. Or, nous avons vu (868) que ces lois ne sont pas rigoureusement exactes et qu'elles se trouvent en défaut, surtout chez les gaz qui sont près de leur point de liquéfaction. Il est donc probable qu'il en est de même pour les vapeurs, qui sont ordinairement peu éloignées de la tension maximum. M. Cahours a reconnu, en effet, que la densité des vapeurs de plusieurs substances organiques diminue notablement à mesure qu'on s'éloigne de leur point d'ébullition, ce qui est dû à l'influence de la cohésion, qui se fait d'autant plus sentir qu'on est plus près de l'état de saturation.

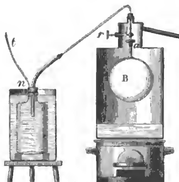


Fig. 715.

Quand la tension est maximum, il est évident que, la masse de vapeur renfermée dans un espace augmentant avec la température, la densité par rapport à l'eau doit aussi augmenter. Mais la densité par rapport à l'air placé dans les mêmes conditions augmente-t-elle ou diminue-t-elle? C'est ce qu'on ne peut décider que par l'expérience; car, si le poids d'un volume d'air diminue quand sa température s'élève, il augmente avec sa pression, qui doit toujours être prise égale à celle de la vapeur à saturation.

M. Regnault a fait beaucoup d'expériences à ce sujet, dans ses recherches sur l'hygrométrie[1]. Il a d'abord déterminé la densité de la vapeur d'eau à 100°, sous des pressions de plus en plus faibles, au moyen de l'appareil (*fig.* 715) : B est un ballon, de 10 litres environ de capacité, portant une monture en laiton, *a*, munie d'un robinet *r*. Après y avoir introduit un peu d'eau, on y fait le vide pendant longtemps; il se forme de la vapeur, qui est absorbée dans un tube rempli de ponce sulfurique; et bientôt tout l'air est chassé du ballon. On ferme alors le robinet *r*. Le ballon est ensuite installé dans une

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XV, p. 141.

étuve à ébullition, et mis en communication avec un flacon *n*, entouré d'eau à la température ambiante, et qui communique par le tube *t* avec un manomètre barométrique (879). On raréfie l'air du flacon, et quand l'eau est en ébullition dans l'étuve, on ouvre le robinet *r*. L'eau du ballon B distille alors et vient se condenser dans le flacon. Au bout d'une heure, on mesure la pression sur le manomètre barométrique, et l'on ferme le robinet *r*. On sépare ensuite le tube du ballon, de celui du flacon ; on dessèche le premier, et l'on pèse le ballon, en prenant toutes les précautions indiquées pour la mesure de la densité des gaz (879). On répète ensuite l'expérience en raréfiant beaucoup plus l'air du flacon. La différence P des poids du ballon dans les deux expériences, donne le poids de la vapeur qui le remplit sous une pression égale à la différence *h* des forces élastiques observées, et à la température T de l'étuve. En représentant par *p* le poids de l'air sec qui remplirait le ballon à 0° et sous la pression de 760^{mm}, par *a* le coefficient de dilatation de l'air, et par K celui du verre, la densité de la vapeur sera $d = \frac{P}{p} \cdot \frac{1 + aT}{1 + KT} \cdot \frac{760}{h}$. Cette méthode a conduit sensiblement à la valeur trouvée par Gay-Lussac, tant que la pression de la vapeur a été assez éloignée de 760^{mm} ; mais pour des pressions voisines de celle-ci, les nombres obtenus ont été sensiblement plus forts.

M. Regnault a encore procédé par une méthode plus exacte, au moyen de l'appareil de la *fig.* 707. La capacité du ballon est mesurée avec soin, et l'eau que contient l'ampoule de verre est pesée d'avance. On procède, d'ailleurs, comme pour mesurer la tension de la vapeur, ainsi qu'il a été dit précédemment (971). — Tant que la température est inférieure à celle qui serait nécessaire pour que l'espace fût saturé au moyen du poids *p* d'eau renfermé dans l'ampoule, la force élastique n'est autre chose que la tension maximum qui correspond à cette température ; mais si l'on chauffe davantage, la vapeur se comporte comme un gaz, et si *f* est sa force élastique, sa densité est donnée par la formule $d = \frac{P}{\pi} \cdot \frac{1 + aT}{1 + KT} \frac{760}{f}$, dans laquelle π est le poids de l'air à 0° et à 760^{mm} qui remplirait l'espace occupé par la vapeur dans le ballon et dans le tube manométrique *t* (*fig.* 707).

M. Regnault a trouvé, par ce moyen, que la densité de la vapeur d'eau *à la même température dans le vide et sous de faibles pressions*, peut se calculer d'après la loi de Mariotte, pourvu que le rapport entre sa force élastique et celle qui aurait lieu à la même température si l'espace était saturé, ne dépasse pas 0,8. Mais quand on approche davantage du point de saturation, la densité est notablement plus forte que celle que l'on calcule en partant de la loi de Mariotte. D'où il faut conclure que les vapeurs dans le voisinage du maximum de tension se compriment plus que ne l'indique cette loi ; résultat d'accord avec celui que donnent les gaz faciles à liquéfier. M. Regnault remarque que le résultat pourrait provenir de ce que le verre retient de l'eau condensée, et en proportion d'autant plus grande que le point de saturation est plus

rapproché ; mais comme d'autres substances ont montré un semblable accroissement rapide de la densité près du point de saturation (986), on est autorisé à admettre qu'une partie au moins de l'accroissement observé sur la vapeur d'eau est réel.

985. Densité de la vapeur d'eau dans l'air saturé. — Les expériences qui précèdent ont été faites dans le vide. Il est important surtout pour l'hygrométrie de savoir si la densité de la vapeur qui sature un espace plein d'air est la même à toute température, c'est-à-dire si elle conserve toujours le même rapport avec la densité de l'air pris à la même température? Des expériences de M. Schmeddink pouvaient faire croire que ce rapport augmentait avec la température. M. Regnault est arrivé à un tout autre résultat.

Dans le cas des températures ordinaires de l'atmosphère, M. Regnault emploie l'appareil (*fig.* 716). L'air attiré dans un vase aspirateur dont on ouvre le

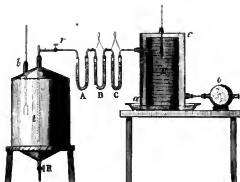


Fig. 716.

robinet R s'humecte en traversant le ballon *o* rempli d'éponges mouillées, et passe dans le manchon en fer-blanc *ac* posé sur une assiette pleine d'eau. Dans l'intérieur se trouve un second manchon en toile métallique T, enveloppé extérieurement et intérieurement d'un linge mouillé baignant dans l'eau de l'assiette. Un thermomètre disposé dans l'axe des manchons est observé de 5 minutes en 5 minutes; la moyenne de ses indications est prise pour la température de l'air. Cet air, complètement saturé, traverse ensuite deux tubes B et C remplis de fragments de pierre ponce imbibés d'acide sulfurique, où il dépose son humidité. Le tube A est destiné à arrêter l'humidité qui pourrait venir du vase aspirateur. Après l'expérience, l'augmentation de poids des tubes B et C représente le poids de vapeur contenu dans le volume d'air qui a traversé l'appareil. Ce volume est égal à celui du vase aspirateur, qui a été jaugé avec soin par des pesées, et dont on connaît la température au moyen du thermomètre *b*.

Pour les températures supérieures à celles de l'atmosphère, l'air aspiré,

après avoir traversé un vase plein d'eau à une température voisine de celle à laquelle on veut opérer, passe, par un tube de fer-blanc *ac* (*fig.* 717), dans le double manchon V, qui est plongé dans un bain continuellement agité et entretenu à une température constante au moyen d'une lampe à alcool. Au moment où commence l'aspiration, le thermomètre intérieur baisse de quelques dixièmes de degré, il y a condensation d'un peu de vapeur, et l'on voit quelques gouttelettes se déposer à l'origine du premier tube desséchant, ce qui fait que son poids est un peu trop fort.

Pour opérer à la température de 0°, M. Regnault fait entrer l'air par l'extrémité *b* d'un tube *ab* (*fig.* 718) entouré de glace fondante que cet air est forcé de traverser. En *c* est adapté le premier tube à ponce sulfurique. L'eau de fusion de la glace s'échappe par le tube *r*.

Pour calculer la densité de la vapeur contenue dans l'air, on calcule le poids de cette vapeur, en partant de son volume et de sa densité dans le vide à la même température, et on l'égale au poids de l'eau retenue par les tubes en U. Soit V le volume de l'aspirateur à 0°, t' sa température à la fin de l'expérience, t la température moyenne de l'air introduit, f et f' les forces élastiques de la vapeur d'eau à saturation aux températures t et t'. Le volume de l'air introduit dans l'aspirateur sera $V(1+kt')$; en représentant par k le coefficient de dilatation de la tôle dont il est formé. La température de cet air est t', et sa pression $H-f'$, en appelant H la pression atmosphérique. A la température t et sous la pression $H-f$ que possède l'air dans le manchon, son volume serait

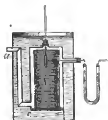


Fig. 717.



Fig. 718.

$$V' = V(1+kt)\,\frac{H-f'}{H-f}\cdot\frac{1+\alpha t}{1+\alpha t'}.$$

Si nous représentons par p le poids d'un centimètre cube d'air à 0° et sous la pression de 760mm, et par δ la densité de la vapeur d'eau par rapport à l'air, le poids de la vapeur contenue dans le volume V' à la température t et sous la pression f, sera

$$V'\cdot p\delta\,\frac{1}{1+\alpha t}\cdot\frac{f}{760}, \qquad \text{ou} \qquad V(1+kt')\,\frac{H-f'}{H-f}\cdot\frac{1}{1+\alpha t'}\cdot p\delta\,\frac{f}{760}.$$

En égalant la valeur ainsi calculée, au poids trouvé par l'expérience, on aura une équation d'où l'on tirera la valeur de δ.

M. Regnault a encore procédé autrement : il a calculé, au moyen de la formule précédente, le poids de la vapeur, en prenant pour sa densité le nombre 0,622,

c'est-à-dire la densité théorique (986), et il a comparé ce poids à celui que donne l'expérience directe.

En opérant ainsi, le poids calculé s'est toujours trouvé un peu plus fort que l'autre, et toujours de la même fraction du poids total, à fort peu près, fraction du reste fort petite et ne s'élevant qu'à 0,01 environ. On conclut de là que la densité de la vapeur à saturation dans l'air aux basses températures, peut se calculer d'après la loi de Mariotte, comme celle de l'air même à laquelle on la compare, et que le rapport du poids de la vapeur à celui d'un égal volume d'air dans les mêmes conditions de température et de pression est un peu plus faible que la densité théorique de la vapeur Cette dernière circonstance pourrait provenir, du reste, de ce que les valeurs de f et f' ont été prises dans les tables qui donnent les tensions dans le vide. Or, nous savons qu'elles sont un peu plus fortes que les tensions dans l'air (947).

986. Densités des vapeurs des diverses substances. — Les expériences qui précèdent sont relatives à la vapeur d'eau. Il était nécessaire, pour les besoins de la chimie, d'opérer sur d'autres substances En effet, la densité de la vapeur des corps composés peut se calculer au moyen de la loi de Gay-Lussac sur la composition des gaz (880). Par exemple, 2 volumes d'hydrogène, pesant 0,1382, et 1 volume d'oxygène, pesant 1,1055, produisent deux volumes de vapeur d'eau, dont la densité doit être, par conséquent, la demi-somme de ces poids, ou 0,6218, nombre qui diffère à peine de 0,6235 trouvé par Gay-Lussac. Dans certains cas, on hésite sur le nombre de volumes de la vapeur du composé formé; alors sa densité pourra décider la question; mais il faudra savoir à quelle distance du point de saturation cette densité doit être prise, ou à partir de quelle température elle devient constante. Il a donc fallu mesurer les densités à différentes distances du point de saturation.

M. Bineau a fait des expériences sur les vapeurs d'*acide formique* et d'*acide acétique* à diverses pressions, et il a reconnu le décroissement de la densité quand on s'éloigne du point de saturation. M. Cahours opérant par la méthode de M. Dumas, c'est-à-dire sous la pression atmosphérique, mais à différentes températures, a reconnu aussi que la densité diminue quand la température s'élève [1]. Pour l'*eau*, l'*éther*, l'*alcool* et ses *congénères*, la densité trouvée s'accorde avec la densité théorique quand on s'éloigne de 30 à 35° du point d'ébullition. Pour l'acide acétique elle est 3,20 à 125° et 2,08 à 250°, température à partir de laquelle elle reste constante; sa densité théorique est 2,09. La densité du *perchlorure de phosphore* n'est sensiblement constante qu'à partir de 300°, celle de l'*acide butyrique* à 261°, celle de l'*essence d'anis* diminue encore un peu à 338°, elle est alors égale à 5,19; la densité théorique est 5,18.

MM. Sainte-Claire Deville et L. Troost ont expérimenté sur des substances ne bouillant qu'aux températures les plus élevées. Pour produire ces

[1] *Comptes-rendus de l'Académie des sciences*, t. XIX, p. 761; XX, 51; et XXI, 625.

températures, ils ont eu recours à l'ébullition de différents liquides, le mercure, le soufre, le chlorure de zinc, le cadmium qui bout à 860°, le zinc qui bout à 1040°. Au-dessus de 800° le ballon de verre de M. Dumas était remplacé par un ballon en porcelaine de Bayeux, qui ne se ramollit pas à des températures de plus de 1200°.

Le ballon B (*fig.* 719) était placé dans un cylindre en fer contenant la substance en ébullition, et fermé par un couvercle en tôle que traverse le col du ballon. Un diaphragme en tôle DD, porté par des pointes en fer intérieures préservent le ballon du rayonnement des parois. On chauffait soit avec la flamme du gaz, soit avec le charbon. Les vapeurs du liquide en ébullition se condensaient dans le tube T, et coulaient au-dehors.

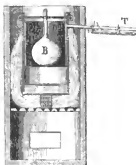


Fig. 719.

L'expérience se fait comme dans la méthode de M. Dumas. Quand on opère dans un ballon en porcelaine, l'ouverture est fermée par un bouchon conique qui laisse échapper la vapeur, et quand elle cesse de se dégager, on fond le bouchon au chalumeau à oxygène et hydrogène. Comme la température est constante, il n'est pas nécessaire de la connaître pour obtenir la densité par rapport à l'air; il suffit de peser le même ballon rempli successivement de vapeur et d'air. Mais comme l'air n'a qu'un poids très faible aux températures très élevées, on lui a substitué la vapeur d'iode, dont la densité 8,716 est beaucoup plus grande, et qui est tellement éloignée de son point d'ébullition qu'on peut admettre que son coefficient de dilatation est constant et égal à celui de l'air.

Voici quelques-uns des résultats obtenus. L'*iode* a donné pour densités dans les vapeurs de soufre, de cadmium et de zinc, c'est-à-dire aux températures de 440°, 860° et 1040°, les nombres sensiblement égaux: 8,70, 8,70 8,71. La vapeur de *soufre* qui a pour densité 6,6 vers 500° a donné 2,23 à 860° et à 1040°. Le *sélenium* a donné 7,67 et 6,37 aux mêmes températures. On voit, par ces deux dernières substances, combien il était important d'opérer à de hautes températures pour pouvoir comparer les résultats aux densités théoriques.

Voici quelques autres résultats obtenus à 440°.

Chlorure d'aluminium	*Bromure d'aluminium*	*Chlorure de zirconium*	*Sesquichlorure de fer.*
9,347	18,62	8,1	11,39.

Ces nombres étant à peine supérieurs aux densités théoriques, on peut admettre qu'à 440° la dilatation de ces vapeurs est uniforme et égale à celle de

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. LVIII, p. 257.

l'air. Citons encore la vapeur de phosphore et celle du cadmium, dont les densités à 1040° sont 4,5 et 3,94.

987. Rapport entre les volumes d'un même poids de liquide et de vapeur. — Quand on connaît la densité d'une vapeur, il est facile de calculer le volume de vapeur fourni par un volume donné de liquide. Considérons, par exemple, la vapeur d'eau : sa densité par rapport à l'air dans les mêmes conditions est $\frac{5}{8}$; en la multipliant par le poids spécifique $0{,}0013\frac{273}{273+100}$ de l'air à 100°, on trouve à peu près $\frac{1}{1680}$ pour la densité de la vapeur d'eau à 100°, par rapport à l'eau à 4°. Les volumes d'une même masse étant en raison inverse des densités, le volume de vapeur à 100°, fourni par un litre d'eau à 1° sera de 1680 litres. Le volume augmente donc énormément, dans le passage de l'état liquide à l'état gazeux, quand la pression n'est pas très considérable.



Fig. 720.

Lorsque la pression est très grande, on peut, au moyen d'une température très élevée, obtenir de la vapeur dont la densité soit peu inférieure à celle du liquide, c'est-à-dire dont le volume ne dépasse pas de beaucoup celui de ce liquide. M. Cagnard-Latour a fait à cet égard des expériences curieuses : il introduisit dans un tube recourbé *ar* (*fig.* 720) une certaine quantité de mercure, et acheva de remplir le réservoir *r* avec de l'*éther*. De l'air, logé en *a*, servait à évaluer la pression. Le réservoir ayant été fermé à la lampe, et l'appareil plongé dans un alliage en fusion, le liquide se réduisit totalement en vapeur, et cette vapeur n'occupait qu'un volume double environ de celui du liquide. L'*alcool* a donné le même résultat; mais avec l'*eau*, l'appareil a toujours éclaté avant que tout le liquide ne fût réduit en vapeur. Des expériences de M. Drion faites sur l'*éther chlorhydrique* lui ont montré que ce liquide se transforme totalement en vapeur vers 170° ; le tube était plongé dans un bain d'huile transparente, de sorte qu'il put saisir le moment de la transformation ; il vit, dans le voisinage de 170°, la surface du liquide remplacée par une couche nébuleuse indécise et privée de pouvoir réflecteur. Cette couche augmentait d'épaisseur dans les deux sens en devenant de moins en moins apparente, et bientôt le tube parut entièrement vide.

§ 4. — MACHINES A VAPEUR.

I. Machines à vapeur fixes.

988. De l'origine de la machine à vapeur. — Une des plus belles inventions, une de celles qui ont exercé le plus d'influence sur le développement

de l'industrie et de la civilisation, est sans contredit la machine à vapeur. Aussi a-t-on été chercher jusque dans l'antiquité la plus reculée les indices les plus légers, les indications les plus fugitives des connaissances que pouvaient avoir les hommes sur la force de la vapeur d'eau, et sur la possibilité de l'employer à produire des effets mécaniques. On a ensuite recherché avec ardeur, souvent même avec passion, les noms des inventeurs des divers systèmes de machines, et ceux des auteurs de leurs principaux perfectionnements. Pendant longtemps l'Angleterre a revendiqué exclusivement pour ses nationaux l'honneur d'avoir découvert le principe et d'avoir inventé les parties les plus importantes de ces merveilleux appareils. Mais le capitaine de frégate Montgéry a montré, dans une série d'articles publiés en 1822 et 1823, combien il en faut rabattre de ces prétentions exclusives. Depuis, un auteur anglais, Robert Stuart, mettant de côté tout esprit national mal entendu, a rendu pleine justice aux véritables inventeurs du principe de la machine à vapeur. Enfin, Arago, dans une notice célèbre publiée, en 1830, dans l'Annuaire du bureau des

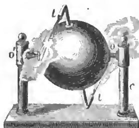


Fig. 721.

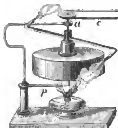


Fig. 722.

longitudes, a établi victorieusement les droits de Papin à la découverte du moyen de faire mouvoir un piston par la force de la vapeur.

Des écrivains ont fait remonter jusqu'à l'antiquité la plus reculée l'origine des machines à vapeur. Héron d'Alexandrie décrit en effet, dans ses *Spiritalia*, un éolipyle tournant, dont la *fig.* 721 peut donner une idée : une sphère creuse, mobile autour d'un diamètre *oo'*, reçoit de la vapeur par le support creux *c* et le pivot foré *o*. Cette sphère porte deux tubes *t*, *t*, coudés dans un plan perpendiculaire à *oo'* ; et elle tourne par un effet de réaction, quand la vapeur s'échappe par les orifices de ces tubes. On répète souvent cette expérience ; la *fig.* 722 représente un appareil très commode pour cela : un vase cylindrique, contenant de l'eau en ébullition, tourne sur lui-même, pendant que la vapeur sort par deux tubes coudés dans un plan horizontal. Le vase est soutenu par une pointe verticale qui termine le support *p*, et il est maintenu en *a* par un anneau dans lequel tourne la tige qui le surmonte.

L'expérience de Héron, à laquelle il ne prétendait attacher aucune importance au point de vue des applications possibles, n'est qu'une simple expérience

de curiosité. Cependant les anciens avaient une idée assez exacte de la force de ressort de la vapeur.

Sénèque explique les tremblements de terre par l'expansion de la vapeur engendrée par le feu souterrain. Au VIe siècle. Agathias raconte qu'Anthémius, pour se venger d'un voisin nommé Zénon, ébranla le plafond de sa chambre au moyen de la vapeur amenée sous les poutres, et sortant de grandes chaudières. Ces notions, où l'on ne peut aucunement trouver le germe de l'emploi de la vapeur comme force motrice, se transmirent sans modification importante jusqu'au XVIIe siècle. En 1605, Flurance Rivault, précepteur de Louis XIII, dans ses *Eléments d'artillerie*, dit que les éolipyles seraient brisés par l'eau convertie en air au moyen du feu, s'il n'y avait pas d'issue.

Salomon de Caus, vers 1615, dans un ouvrage d'assez peu de valeur, intitulé *les Raisons des forces mouvantes*, cite l'expérience suivante : on prend une balle de cuivre (*fig.* 723), dans laquelle s'enfonce un tube *t*, on y introduit de l'eau par l'ouverture *a*, dont on ferme ensuite le robinet, et on la met sur le feu. Au bout de quelques instants, toute l'eau, poussée par la vapeur, jaillit par le tube *t*. Il y a loin de cette simple expérience de physique, à l'idée d'employer la vapeur pour élever des colonnes d'eau, et Salomon de Caus ne dit rien qui puisse faire supposer qu'il ait eu une semblable idée. D'ailleurs, l'effet qu'il produit avec son appareil n'était pas nouveau : J.-B. Porta avait décrit une disposition au moyen de laquelle on arrive au même résultat, seulement la vapeur était formée dans un vase à part. C'est donc à tort que l'on a regardé Salomon de Caus comme ayant eu le premier l'idée d'employer la vapeur à élever l'eau ; il n'avait eu en vue qu'une simple expérience de curiosité, qu'il ne donne même pas comme étant de lui.

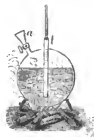


Fig. 723.

Depuis, on a fait servir le jet de vapeur de l'éolipyle à faire tourner de petites roues à palettes. Branca cite un appareil semblable, et ajoute qu'on peut, par ce moyen, mettre en action des pilons pour broyer de la poudre ; nous trouvons là l'idée d'employer la vapeur pour produire des effets mécaniques, mais par un moyen qui ne peut donner que des résultats insignifiants.

En 1663, le marquis de Worcester décrit d'une manière confuse un appareil analogue à ceux de Salomon de Caus et de Porta, et au moyen duquel on pourrait élever l'eau. Il ne paraît pas qu'il ait jamais exécuté un semblable appareil, et ceux qui ont voulu, d'après la description incomplète qu'il donne, en tracer un dessin, sont tous arrivés à des résultats différents. L'idée d'employer la vapeur pour produire des effets mécaniques se trouve cependant dans cette description, mais nous avons vu qu'elle avait déjà été émise, et le marquis de Worcester ne peut pas plus être regardé comme l'inventeur de l'emploi de la vapeur comme force motrice, que le P. Lana ne peut être considéré comme l'inventeur des aérostats, parce qu'il a indiqué la possibilité de

s'élever dans l'air en remplissant des vases, d'air raréfié, sans indiquer de moyen praticable d'exécuter cette opération (I, 400).

Nous voyons qu'au XVII[e] siècle le principe des moteurs à vapeur était encore à trouver, et rien ne pouvait faire pressentir qu'on réussirait un jour à appliquer la force de la vapeur à faire mouvoir des machines, lorsque Denis Papin, né à Blois, publia, en 1690, la description d'une expérience fondamentale qui contient le principe même de la machine à feu telle qu'on l'emploie encore aujourd'hui.

989. Expérience de Papin. — Toricelli venait de découvrir le baromètre ; Otto de Guericke, par des expériences ingénieuses, et au moyen de la machine pneumatique qu'il venait d'inventer, avait montré les effets extraordinaires de la pression atmosphérique ; toutes les imaginations étaient surexcitées par la nouveauté de ces découvertes ; la puissance de la pression de l'air frappait surtout les esprits, et l'on songeait de tous côtés à en tirer parti. Otto de Guericke avait fait une expérience curieuse que nous avons eu l'occasion de décrire (I, 337), par laquelle il faisait mouvoir un piston dans un cylindre, après y avoir fait le vide. En reprenant cette expérience, Papin chercha les moyens de produire le vide avec économie ; il imagina d'abord de faire mouvoir, au moyen du vent ou d'une chute d'eau, des machines pneumatiques, qui auraient communiqué par de longs tuyaux avec un corps de pompe, pour faire le vide sous un piston renfermé dans son intérieur. Il pourrait ainsi, disait-il, « transporter au loin la force des rivières. » Et nous avons vu que c'est là le principe du chemin de fer atmosphérique. Il essaya plus tard de brûler de la poudre sous le piston, qui devait ensuite s'enfoncer sous l'effort de la pression atmosphérique, après que les gaz refroidis se seraient contractés ; mais il restait une telle quantité de gaz, que l'effet était toujours très faible. C'est alors que Papin eut l'idée de remplir le corps de pompe de vapeur, et de la condenser ensuite par le froid. Il prit un cylindre fermé par le bas contenant un peu d'eau, et y enfonça un piston P (*fig.* 724). L'air s'échappa par un petit trou qu'il boucha ensuite au moyen de la tige *o*. Ayant alors apporté du feu sous le cylindre, l'eau entra en ébullition, et la vapeur souleva le piston jusqu'au haut du corps de pompe. Là, il fut arrêté par une clavette à ressort *r*, qui s'enfonça dans une encoche, ménagée dans la tige *t*. Le feu, étant alors enlevé, la vapeur se condensa, et la clavette *r* ayant été retirée, le piston descendit sous l'effort de la pression atmosphérique. Le feu fut ensuite rapproché, et le piston remonta pour redescendre quand la vapeur se fut de nouveau condensée.



Fig. 724.

Papin ne se contente pas de décrire cette expérience, il entre dans de nombreux détails sur les applications que l'on peut faire du mouvement de va et

vient de son piston, soit pour faire mouvoir des pompes et épuiser l'eau des mines, soit pour faire marcher des *rames tournantes* fixées à des bateaux.

On a cru pendant longtemps que Papin s'en était tenu à de simples essais faits sur une petite échelle; mais il résulte d'une correspondance de ce savant avec Leibnitz, retrouvée récemment par M. Kuhlmann, de l'Université de Hanovre, que Papin a fait exécuter une machine à piston avec des dimensions assez grandes pour qu'elle pût servir à faire marcher un bateau au moyen de roues à aubes [1]. Il paraît que ces essais avaient eu un certain retentissement, car le comte de Sintzendorff, qui possédait en Bohême plusieurs mines inondées, demanda à Papin de venir les dessécher au moyen de sa machine. Les droits de Papin à l'invention des machines dans lesquelles la vapeur fait mouvoir un piston dans un corps de pompe, sont donc établis d'une manière irrécusable, tant au point de vue de l'idée théorique qu'à celui de la réalisation pratique.

990. Machine de Savery. — Les essais et les applications de Papin paraissaient oubliés, lorsque le capitaine Savery, en 1698, construisit la machine à élever l'eau qui porte son nom, et dans laquelle il appliqua le principe de la condensation de la vapeur pour faire le vide. La vapeur se forme dans deux chaudières (*fig.* 725), communiquant l'une avec l'autre par la partie supérieure. Cette vapeur peut passer, par des tuyaux T, T′, dans des réservoirs V et V′, dont la partie inférieure communique avec deux tubes *r′s′*, *rs* munis chacun de deux soupapes. Ces tubes aboutissent par le haut au tuyau d'ascension A, et par le bas, à un tuyau d'aspiration qui plonge dans l'eau que l'on veut élever. Un levier *c* sert à ouvrir ou à fermer alternativement les tubes T, T′ au moyen d'une vanne *o* que l'on voit à part en *c″oo′*.

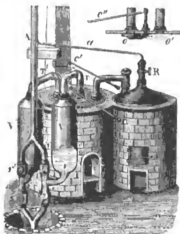


Fig. 725.

Supposons que le tube T soit ouvert, et le tube T′ fermé; la vapeur s'introduit dans le réservoir V, s'y condense d'abord en l'échauffant; puis soulevant la soupape *r*, qui s'ouvre de bas en haut, s'échappe en entraînant tout l'air qui remplit le réservoir. On ferme ensuite le tube T, et l'on projette de l'eau froide sur le réservoir V, au moyen d'un robinet *c′* que l'on amène au-dessus; la vapeur est condensée, la soupape *r* se ferme, et la pression atmosphérique fait monter l'eau dans le

[1] On peut lire cette curieuse correspondance dans l'ouvrage intitulé: *Exposition et histoire des principales découvertes scientifiques modernes*, par M. L. Figuier, t. III.

réservoir V, par le tube d'ascension et par la soupape *s*, qui se soulève. Quand le réservoir V est rempli d'eau, on y fait arriver de nouveau la vapeur, qui presse sur cette eau et la fait monter dans le tube d'ascension A. Le réservoir V étant alors vide d'eau et rempli de vapeur, on ferme le tube T, la vapeur est condensée par l'injection d'eau froide venue du robinet *c'*, et le réservoir V se remplit de nouveau d'eau; et ainsi de suite. Le réservoir V' produit le même jeu, alternativement avec le réservoir V. Le tube *a* et le robinet P servent à renouveler l'eau de la chaudière. On voit que l'ouvrier qui dirige la machine n'a qu'à faire mouvoir le levier *c* pour introduire la vapeur alternativement en V et en V', et à faire passer le robinet *c'* au-dessus de l'un ou de l'autre de ces réservoirs. Dans la machine de Savery, il y a une grande perte de vapeur, provenant de la condensation, des premières portions qui s'introduisent. Papin a plus tard diminué cet inconvénient, au moyen d'un flotteur en forme de caisse, dont la surface supérieure, séparée de l'eau, pouvait conserver en grande partie la chaleur que la vapeur lui avait communiquée une première fois.

991. Machine atmosphérique. — La machine de Savery ne pouvait élever l'eau à une grande hauteur, cette hauteur dépendant de la tension de la vapeur, qui aurait dû être énorme pour les profondeurs des mines; aussi n'a-t-elle guère été employée que pour faire monter l'eau dans les jardins de plaisance, sur des terrasses. La question de l'épuisement des mines était donc loin d'être résolue, et les mécaniciens cherchaient avec ardeur une solution plus satisfaisante que celle de Savery. Un artisan de Dartmouth, Newcomen, eut l'idée de se servir de pompes ordinaires, et de les mettre en mouvement au moyen du système à piston de Papin (989). Associé avec un autre artisan, Cawley, puis avec Savery, qui était muni d'un privilége relatif à la production du vide par la condensation de la vapeur, il construisit la première machine qui ait été employée avec succès à l'épuisement des mines. Cette machine, connue sous le nom de *machine atmosphérique*, est représentée dans la *fig.* 726. Un corps de pompe muni d'un piston P communique par le bas avec la chaudière C. La tige du piston est attachée par une chaîne, à un levier très fort BB, nommé *balancier*, dont l'autre extrémité soutient la tige T de la pompe qu'il s'agit de faire mouvoir. Pour que cette tige et celle du piston P marchent verticalement, les chaînes s'enroulent sur des arcs B, B. Deux robinets, ou soupapes, *r*, *r'*, servent à faire communiquer le bas du corps de pompe, successivement avec la chaudière et avec un réservoir R contenant de l'eau que lui fournit la pompe *p*, mise en mouvement par la machine même. Supposons le robinet *r* ouvert et *r'* fermé, la vapeur passe sous le piston, et pour peu que sa tension dépasse la pression atmosphérique, le piston s'élève, son poids étant équilibré par une charge Q placée de l'autre côté du balancier. Quand le piston est arrivé au haut de sa course, on ferme le robinet *r* et l'on ouvre le robinet *r'*; l'eau, sortant par un grand nombre de petits orifices, jaillit à travers la vapeur, et la condense rapidement par son contact direct; le vide se fait et la pression atmosphérique fait descendre le piston, avec une force qui dépend de l'étendue

de sa surface. Par exemple, si l'aire de cette surface est de 1 mètre carré, et si l'on néglige la tension de la vapeur qui reste, le piston est poussé par une force de 10,000 kil. environ; puisque la pression atmosphérique équivaut à 1 kilogramme à peu près sur chaque centimètre carré (I, 313).

Dans le principe, on condensait la vapeur en faisant passer un courant d'eau froide dans une enveloppe extérieure qui entourait le corps de pompe. Le refroidissement se faisait alors difficilement à travers les parois, et la machine marchait très lentement. Un jour, les inventeurs virent le piston descendre rapidement et plusieurs fois de suite, sans qu'on eût ouvert le robinet r'. Ayant cherché la cause de ce phénomène, ils reconnurent que l'eau dont on avait coutume de recouvrir le piston pour éviter la rentrée de l'air par les joints, avait pu passer par un trou qui se trouvait accidentellement dans le piston ; ils imaginèrent alors de condenser la vapeur par le contact direct de l'eau, en la lançant sous forme de pluie dans le corps de pompe, ce qui refroidit beaucoup moins ce corps de pompe, de sorte qu'il y a une grande économie de vapeur, et, par conséquent, de combustible.

Fig. 726.

L'eau introduite dans le corps de pompe, ainsi que celle qui provient de la vapeur condensée, est évacuée de temps en temps par le robinet S'. Le robinet S sert à renouveler celle qui doit toujours se trouver au-dessus du piston, parce que l'on ne connaissait pas, dans le principe, l'art de construire des corps de pompe parfaitement cylindriques.

La manœuvre des robinets r et r' était d'abord confiée à un ouvrier. Un jour, un enfant, nommé Humphrey Potter, chargé de cette tâche, imagina, pour s'en débarrasser, d'attacher au levier des soupapes r, r', deux ficelles qu'il fixa par l'autre bout au balancier, de manière que celui-ci, en montant et en descendant, faisait ouvrir et fermer les soupapes. Cette invention fut ensuite perfectionnée : l'ingénieur Brighton fixa au balancier BB une barre t, nommée *plug-frame*, munie de chevilles qui, en montant ou descendant, faisaient mouvoir les soupapes ou les robinets, par l'intermédiaire de leviers coudés o, c. La machine marcha alors d'elle-même ; il n'y eut plus qu'à entretenir le feu, et à ajouter de temps en temps de l'eau dans la chaudière.

992. Condenseur de Watt. — La machine atmosphérique de Newcomen présente l'inconvénient majeur de faire perdre une quantité notable de vapeur,

qui se condense dans le corps de pompe refroidi par l'injection d'eau froide. En 1763, l'écossais James Watt, ayant été chargé de réparer un modèle de machine de Newcomen, qui faisait partie du cabinet de physique de l'Université de Glasgow dont il était conservateur, fut frappé des inconvénients dont il s'agit, inconvénients rendus plus apparents par la petitesse du modèle. Pour y parer, il songea d'abord à n'injecter que peu d'eau dans le corps de pompe ; mais alors cette eau devenant très chaude, la tension de sa vapeur était assez grande pour résister notablement à la descente du piston. Il eut alors l'idée d'opérer la condensation en dehors du corps de pompe, dans un vase à part, nommé *condenseur*, mis en communication avec ce corps de pompe au moment où l'on veut y faire le vide. L'eau injectée, et l'air qui s'en dégage dans le vide, sont enlevés continuellement par une pompe, nommée *pompe à air*. Cette pompe est mise en jeu par la machine elle-même, ce qui occasionne bien une dépense de force, et par suite une perte de vapeur ; mais cette perte est beaucoup plus petite que celle que l'on évite par l'emploi du *condenseur*.

Le corps de pompe restait donc toujours brûlant, et les premières portions de vapeur introduite pouvaient alors agir sans éprouver la condensation. Mais un inconvénient nouveau se présentait : l'eau que l'on met au-dessus du piston, en coulant par les joints, se réduisait en vapeur et retardait la formation du vide. D'un autre côté, l'air qui descend dans le corps de pompe à la suite du piston, refroidit en dedans les parois, ce qui entraîne une perte de vapeur quand le piston remonte. Pour obvier à ces différents inconvénients, Watt imagina de fermer le corps de pompe à sa partie supérieure, par un couvercle muni d'une ouverture centrale, garnie d'une *boîte à étoupe* que traverse la tige du piston ; et de remplacer la pression atmosphérique par celle de la vapeur, introduite au-dessus du piston. Pour faire marcher la machine, on fait d'abord passer la vapeur en même temps de chaque côté du piston, qui monte alors par l'effet d'un contre-poids placé à l'extrémité opposée du balancier ; puis on fait communiquer le bas du corps de pompe avec le condenseur. Enfin, pour empêcher le refroidissement du corps de pompe en dehors, Watt fait circuler la vapeur dans l'espace compris entre sa surface et une enveloppe extérieure ou chemise, dont il l'environne de toutes parts.

Machine à simple effet. — Le mouvement de l'appareil ainsi perfectionné est entièrement dû à l'action de la vapeur ; la pression de l'air n'a plus aucune influence. On le nomme *machine à simple effet*, parce que la vapeur ne pousse le piston que d'un côté, pendant sa descente.

Ce n'est qu'à partir de ces remarquables perfectionnements que la machine à vapeur put sortir des mines où le charbon est à vil prix, pour se répandre dans les usines et les ateliers. L'adjonction du condenseur économise environ les deux tiers du combustible. Malgré cet avantage immense, Watt eut à lutter pendant longtemps pour faire adopter ses appareils. Sans fortune, et réduit à faire ses essais en construisant lui-même de petits modèles avec des fioles et des tubes de verre, il semblait avoir renoncé à tirer parti de ses découvertes,

lorsque sa profession d'arpenteur le mit en rapport avec le Dr Rœbuck, capitaliste intelligent, avec lequel il s'associa; mais Rœbuck perdit tout à coup toute sa fortune. Heureusement qu'un manufacturier de Birmingham, Boulton, homme actif et entreprenant, se trouva là pour remplacer Rœbuck. Malgré son influence et son activité, plus de 1,200,000 francs furent d'abord dépensés en pure perte; la machine atmosphérique avec tous ses inconvénients fut encore longtemps préférée, soit à cause du préjugé et de la routine, soit à cause des frais plus considérables de premier établissement qu'exigeait la machine à condenseur.

Pour donner une idée de l'économie de combustible réalisée par le condenseur, nous citerons le fait suivant : Watt et Boulton exigeaient de ceux qui voulaient remplacer une machine de Newcomen par leur appareil perfectionné, la valeur du tiers de l'économie de combustible donnée par ce dernier. Des expériences préliminaires, faites sur les deux machines, donnaient l'économie du combustible, pour un certain nombre de coups de piston; et l'on pouvait connaître le nombre de coups de piston accomplis pendant chaque année, au moyen d'un compteur renfermé dans une caisse à deux serrures, que le balancier faisait marcher. Or, l'économie de combustible fut telle, dans trois machines établies à la mine de Chacewater, en Cornouailles, que les propriétaires rachetèrent pour 60,000 francs par an le tiers d'économie revenant aux inventeurs; ce qui suppose une économie totale de plus de 180,000 francs.

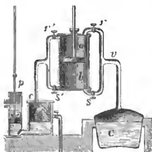


Fig. 727.

993. Machine à double effet. — Dans la machine à simple effet, les deux mouvements opposés du piston ont lieu avec des vitesses inégales, puisque ce n'est que dans le mouvement de descente que le piston reçoit l'impulsion de la vapeur. Cette circonstance, sans inconvénient quand il s'agit de faire mouvoir des pompes, en présente de graves quand il s'agit d'appliquer la machine à des appareils qui exigent un mouvement régulier, comme les métiers à filer ou à tisser. Watt proposa d'abord de placer un cylindre à piston à chaque extrémité du balancier; mais il remplaça bientôt cette disposition par celle de la *machine à double effet*, dans laquelle un seul piston est poussé par la vapeur, alternativement en sens opposé.

Le jeu de la machine à double effet peut se comprendre facilement au moyen de la *fig.* 727 : la partie supérieure et la partie inférieure du corps de pompe peuvent être mises en communication, tantôt avec la chaudière C, tantôt avec le condenseur *c*, par les robinets *r*, *s*, *r'*, *s'*. Supposons d'abord que les robinets *r* et *s'* soient ouverts et les deux autres fermés. La vapeur passe au-dessus du piston et le fait descendre, pendant que l'air ou la vapeur qui se trouve

au-dessous se rend dans le condenseur par le robinet s'. La pompe à air p enlève l'air et l'eau de ce dernier. Quand le piston est arrivé au bas de sa course, on ouvre à leur tour les robinets r', s, et l'on ferme les deux autres. La vapeur passe alors au-dessous du piston et le soulève, tandis que celle qui remplit la partie supérieure du corps de pompe, se précipite dans le condenseur par le robinet r'.

994. Parallélogramme de Watt. — Le balancier auquel est fixée la tige du piston, devant être poussé de bas en haut quand le piston monte, on ne peut plus, pour conserver le mouvement rectiligne de sa tige, employer des chaînes s'enroulant sur des arcs, comme dans la *fig.* 728. Watt pensa d'abord à garnir ces arcs, de dents, et à terminer la tige du piston par une crémaillère, comme dans la machine pneumatique ; mais l'usure rapide des dents lui fit imaginer une autre disposition extrêmement ingénieuse, dont voici le principe.

Supposons deux barres égales $O\delta$, $\varepsilon\gamma$ (*fig.* 728) réunies par un levier articulé $\gamma\delta$. Les extrémités δ et γ des barres décrivant des arcs de cercles $\delta\delta'$, $\gamma\gamma'$, le levier $\delta\gamma$ viendra de la position $\delta\gamma$ en $\delta'\gamma'$, et l'on conçoit que son milieu c puisse se mouvoir suivant une ligne droite. Cependant nous devons dire que la ligne parcourue par ce point n'est pas rigoureusement rectiligne, mais qu'elle présente un point d'inflexion près duquel la courbure est assez peu prononcée pour qu'on puisse la considérer comme une ligne droite. Cela posé, prolongeons la barre $O\delta$ d'une quantité $\delta\alpha$ égale à elle-même, et supposons que $O\alpha$ soit le demi-balancier d'une machine à vapeur. Construisons, avec des tringles parallèles deux à deux, un parallélogramme $\alpha\beta\gamma\delta$ dont les côtés soient articulés aux angles, de manière qu'il puisse prendre différentes formes $\alpha\beta\gamma\delta$, $\alpha'\beta'\gamma'\delta'$. Le point c parcourant une ligne droite, il est facile de voir que le point β décrira aussi une ligne droite parallèle à cc'. En effet, les trois points O, c, β, sont en ligne droite, puisque $\alpha\beta = \delta\gamma$ est le double de δc, de même que $O\alpha$ est double de $O\delta$. On a donc $Oc : O\beta = O\delta : O\alpha$; on a de même $Oc' : O\beta' = O\delta' : O\alpha'$. On tire de ces deux proportions $Oc : O\beta = Oc' : O\beta'$. La droite cc' est donc parallèle à celle qui joint les points β et β', et comme cela a lieu, quelle que soit l'étendue du déplacement cc' ou $\beta\beta'$, on voit que si cc' est une ligne droite, le chemin parcouru par le point β est aussi une ligne droite. C'est en ce point que se trouve articulée la tige du piston ; celle de la pompe à air s'articule au point c.

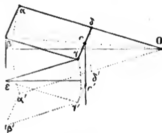


Fig. 728.

Nous avons supposé que la longueur $O\alpha$ était double de $O\delta$, et $\varepsilon\gamma$ égal à $O\delta$. Il y a d'autres proportions qui satisfont au problème proposé ; celles que nous avons supposées sont les plus usitées.

995. Distribution de la vapeur. — La machine elle-même est chargée de faire passer la vapeur d'un côté du piston ou de la conduire dans le condenseur. Les pièces destinées à cet usage, et qui remplacent les robinets r, r', s, s' (*fig.* 727), se nomment la *distribution* ; il y en a de différentes sortes.

Soupapes de distribution. — Watt a d'abord adopté un système de soupapes à charnière, qu'il a plus tard disposées comme on le voit dans la *fig.* 729 : au haut et au bas du corps de pompe se trouvent annexées deux boîtes à soupapes *so*, *s'o'* munies de deux ouvertures, et contenant deux soupapes coniques. Les ouvertures inférieures *o*, *o'* communiquent avec le condenseur, et les ouvertures supérieures, avec la chaudière. La tige de la soupape supérieure, dans chaque boîte, est formée par un tube dans lequel glisse la tige de la soupape inférieure. Ces deux tiges sortent au-dehors à travers une boîte à étoupe, et sont fixées par des traverses horizontales, à deux tringles verticales *l*, *t*, de manière que l'une des soupapes supérieures soit fixée à la même tringle que l'une des soupapes inférieures. Ces tringles sont poussées de bas en haut ou de haut en bas par un système de *plug-frame* analogue à celui que nous avons décrit (991). Quand les soupapes sont placées comme dans la figure, la vapeur pénètre dans la partie supérieure du corps de pompe, dont la partie inférieure communique avec le condenseur par l'ouverture *o'*. Si l'on vient à relever la tringle *t* et à abaisser la tringle *l*, les soupapes *s* et *r'*, qui étaient ouvertes, se ferment, et les deux autres s'ouvrant, la vapeur passe sous le piston, et la partie supérieure du corps de pompe communique avec le condenseur par l'ouverture *o*.

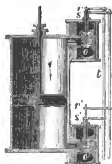


Fig. 729.

Tiroirs. — La *fig.* 780 représente une autre disposition, due aussi à Watt, et fréquemment employée : la vapeur arrive en *v* et tend à s'introduire dans un espace cylindrique, communiquant avec les extrémités du corps de pompe, et contenant deux pistons *p*, *p*, reliés entre eux par une tige qui sort au-dehors à travers une boîte à étoupe. L'ouverture *o* communique avec le condenseur. Quand les pistons *p*, *p* sont dans la position de la figure, la vapeur qui arrive en *v* pénètre dans la partie supérieure du corps de pompe, dont le piston P s'abaisse, pendant que la partie inférieure communique avec le condenseur. Le contraire a lieu, et le piston P monte, quand les pistons *p*, *p* sont placés dans la position *r*, *r*.

Souvent on remplace les pistons *p*, *p* par une pièce creuse *mn* (*fig.* 731), nommée *tiroir* ou *glissoir*, et autour de laquelle circule la vapeur arrivant en *v* Les parties extrêmes de cette pièce sont parfaitement dressées, et leur section, que l'on voit en *a*, présente la forme d'un demi-cercle dont la partie plane, représentée en M, s'applique exactement sur une surface bien dressée, dans

laquelle s'ouvre la communication avec la partie supérieure c ou la partie inférieure c' du corps de pompe. La partie courbe peut glisser dans une garniture d'étoupes *i*, *i*, qui l'entoure, de manière à former une espèce de piston plongeur. Enfin, l'extrémité *n* de l'espace demi-cylindrique qui contient le tiroir, communique avec le condenseur.



Fig. 730.

Dans la position de la figure, la vapeur passe dans la partie inférieure du corps de pompe, tandis que la partie supérieure communique avec le condenseur par l'intérieur du tiroir, dont la coupe est en *a*. Dans la position *xx* du tiroir, le contraire a lieu, et le piston descend. Cette disposition porte souvent le nom de *soupape* ou de *tiroir en D*, à cause de la forme de la section transversale.

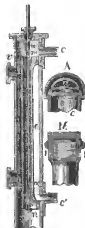


Fig. 731.

Ce système de distribution présente un inconvénient grave : le tiroir ne se dilate pas régulièrement, à cause du défaut d'homogénéité ; il se gauchit, ce qui fait qu'une seule des surfaces planes coïncide exactement, et que l'autre laisse passer la vapeur. On a évité cet inconvénient en coupant le tiroir en deux, de manière à laisser les deux extrémités indépendantes l'une de l'autre.

Tiroir à coquille. — Ce tiroir, imaginé en 1801 par Murray, de Leeds, est formé par un prisme rectangulaire en fonte T (*fig.* 732), creusé d'un côté, comme on le voit dans la coupe transversale C. Cette pièce glisse dans l'intérieur d'une caisse ou *boîte à vapeur*, dans laquelle la vapeur entre par le tuyau *v*. L'une des faces du tiroir s'applique exactement sur une surface bien dressée, dans laquelle sont pratiquées trois ouvertures, communiquant l'une, *o*, avec le condenseur, et les deux autres avec la partie supérieure et la partie inférieure du corps de pompe. Dans la position *t* du tiroir, la vapeur passe sous le piston, et la partie supérieure du corps de pompe communique avec le condenseur par la cavité pratiquée dans le tiroir. L'inverse a lieu dans la position *t'* ; c'est alors la partie inférieure du corps de pompe qui communique par l'ouverture *o'* avec le condenseur. Le mouvement est imprimé au tiroir par la tige *t* qui traverse une boîte à étoupes.

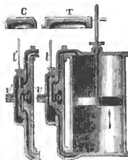


Fig. 732.

Le tiroir à coquille fournit le meilleur distributeur, mais malheureusement il ne peut s'employer dans les grandes machines, car la vapeur l'appuie contre la surface sur laquelle il glisse, avec une force proportionnelle à son étendue, et le frottement devient énorme quand ses dimensions sont grandes. C'est cet inconvénient qui a conduit à imaginer le tiroir en *D*.

Robinet à quatre voies. — Enfin, on emploie encore le robinet à quatre voies de Papin (I, 165). Dans la position *l* (*fig.* 732), la vapeur qui arrive en *v* passe au-dessous du piston par le conduit *i*, tandis que la partie supérieure du corps de pompe communique par l'ouverture *c* avec le condenseur. L'inverse a lieu dans la position *l'* du robinet. — Le robinet de Papin a le défaut de s'user assez rapidement, parce que la clef doit être fortement serrée dans son boisseau, pour éviter les fuites.

996. Excentrique. — Les tiroirs et les robinets à quatre voies sont dirigés par la machine elle-même. Voici le moyen le plus généralement employé pour

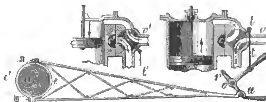


Fig. 733.

cela : dans les machines à double effet, le mouvement d'oscillation du balancier est transformé en un mouvement de rotation imprimé à un arbre horizontal muni d'un volant. Cet arbre, O (*fig.* 733), porte un *excentrique*, qui n'est autre chose qu'une roue dont le plan est perpendiculaire à l'axe de l'arbre, mais dont le centre est en dehors de cet axe, de manière qu'elle ne tourne pas autour de son centre de figure ; on voit en *e* et *e'* ses deux positions diamétralement opposées. Un anneau portant un système de tringles *ea* enveloppe l'excentrique, qui peut tourner dans cet anneau, de manière que le point *a* prend un mouvement de va et vient, qui le rapproche et l'éloigne successivement de O, à chaque tour que fait l'excentrique. L'extrémité *a* porte une cavité qui s'engage dans une saillie cylindrique placée à l'extrémité d'un levier coudé dont l'axe est en *o*. Ce levier agit, par la tige *t*, sur la clef *l* du robinet à quatre voies, ou sur la tige du tiroir qu'il s'agit de faire mouvoir, de manière à régler l'introduction de la vapeur.

997. Renversement de la vapeur. — Il y a des machines, comme celles qui font marcher les navires, dans lesquelles il faut pouvoir faire tourner l'arbre dans un sens ou dans le sens opposé, à volonté. L'opération par laquelle

on change le sens du mouvement s'appelle *renverser la vapeur*. Pour obtenir ce résultat, il faut modifier brusquement la position du robinet ou du tiroir (ce que l'on obtient en agissant avec la main sur une manette qui termine le bras *t* du levier coudé *aot* (*fig.* 733)), et faire en sorte que l'excentrique *e* fasse mouvoir la tige *t* en sens opposé. C'est à quoi l'on arrive facilement en plaçant en *r* l'extrémité *a* de la tringle *ea*, de manière à la faire agir sur le

Fig. 734.

bras de levier *ro*, et par conséquent à donner à la tige *t* un mouvement inverse de celui qu'elle éprouverait, dans les mêmes positions de l'excentrique, si la tringle agissait sur le bras de levier *ao*.

998. Description de la machine de Watt. — Il est facile, au moyen des détails qui précédent, de se rendre compte de l'ensemble de la machine de Watt à double effet (*fig.* 734) : le corps de pompe, que l'on voit à gauche, reçoit la vapeur par le tuyau V, qui la conduit d'abord dans la boîte de distribution *bv*. La tige du piston est articulée par l'intermédiaire du parallélogramme $\alpha\beta\gamma$ avec l'extrémité du balancier $\alpha\alpha'$, levier très fort, ordinairement en fonte, mobile sur deux tourillons qu'il porte en son milieu. L'autre extrémité α' du balancier est articulée avec une bielle B, articulée elle-même par son autre extrémité à une manivelle *m* fixée à l'arbre qu'il s'agit de faire tourner : de manière que le mouvement d'oscillation que reçoit la bielle se

transforme en un mouvement de rotation. Il est facile de voir que la manivelle doit avoir pour longueur la moitié de la course du piston, quand les deux bras du balancier sont égaux, ce qui a lieu ordinairement. Un volant FF, très pesant, sert à régulariser les mouvements, et en même temps à faire franchir, par sa vitesse acquise, les deux *points morts* ou *instants critiques*, qui correspondent aux positions où la bielle est sur le prolongement de la manivelle; alors l'effet exercé par la bielle ne fait que presser la manivelle contre l'arbre, sans lui imprimer de mouvement.

La tringle T, T, fixée à l'anneau qui entoure l'excentrique de l'arbre, fait mouvoir le tiroir, au moyen du levier *vi* et par l'intermédiaire de deux *bielles pendantes b* fixées aux extrémités d'une barre transversale que la tige du tiroir porte en *f*. C est le condenseur, dans lequel on règle l'arrivée de l'eau d'injection au moyen du robinet *rr*. Cette eau vient d'une bâche alimentée par la pompe P, mise en mouvement par le balancier, et qui prend l'eau dans un puits ou à toute autre source. A est la pompe à air; l'eau chaude qu'elle extrait du condenseur C est conduite au-dehors par un tuyau *e*; une partie est aspirée au moyen du tube *t*, par la pompe d'alimentation *p* qui la refoule dans la chaudière, pour remplacer l'eau qui disparaît à l'état de vapeur. Cette pompe est ordinairement une pompe à piston plongeur, analogue à celle que nous avons décrite (1, 352); seulement les soupapes sont souvent de simples sphères métalliques dont le déplacement est limité par des brides en métal.

Modérateur à force centrifuge. — Pour rendre régulière la vitesse d'une machine, malgré les changements dans les résistances qu'elle peut avoir à vaincre, Watt a imaginé de faire varier la masse de vapeur qui arrive dans la boîte de distribution, de manière à en fournir une moindre quantité quand la vitesse s'accélère. Il a employé pour cela le pendule conique déjà en usage pour régler la position des vannes dans les récepteurs hydrauliques. Cet appareil, figuré en R (*fig.* 734), consiste en deux boules très lourdes suspendues, par deux barres articulées, à un arbre vertical R*o*. Deux autres barres sont articulées aux deux premières par une extrémité, et par l'autre, à un anneau *a* qui peut glisser le long de l'arbre R*o*. Les quatre barres forment ainsi un losange, qui se rapproche d'autant plus de la figure d'un carré que les boules sont plus écartées l'une de l'autre, ou, ce qui revient au même, que l'anneau *a* est plus élevé. Ce système reçoit de l'arbre du volant, un mouvement de rotation autour de l'axe R*o*, par la corde sans fin *cc* et les roues dentées *o*. Quand la vitesse de la machine, et, par suite, celle de l'appareil R augmente, la force centrifuge fait écarter les boules, et l'anneau *a* monte; il descend, au contraire, quand la vitesse diminue. Cet anneau porte une gorge dans laquelle s'engage à frottement doux, une fourchette qui termine un levier *ll*; de manière que le bras *ll* s'élève et s'abaisse en même temps que l'anneau *a*. L'autre bras agit, par l'intermédiaire de tringles *x*, *x*, *x*, et de leviers coudés S, S, sur une clef que l'on voit dans le tuyau d'arrivée V, de manière à gêner plus ou moins le passage de la vapeur.

On emploie aussi, pour remplir le même objet, le *régulateur Molinié*, qui consiste en une espèce de soufflet cylindrique vertical, disposé comme celui de la soufflerie (I, 578). La tablette supérieure agit par une tige sur la clef du tuyau V; elle s'élève plus ou moins suivant que le mouvement intermittent communiqué par la machine à la tablette inférieure du soufflet, est plus ou moins rapide.

999. Machines à haute pression. — Watt, en 1769, s'était réservé le droit, pour le cas où l'eau serait rare, de construire des machines dans lesquelles la vapeur ne serait pas condensée après avoir produit son effet, et s'échapperait simplement dans l'atmosphère. Ce système avait déjà été indiqué par Papin, et le principe en avait été décrit par Leupold en 1724. Il est évident que, dans ce cas, le piston éprouve du côté vers lequel il marche, une résistance égale à la pression atmosphérique. La vapeur qui le presse du côté opposé doit donc posséder une tension égale au moins à deux atmosphères, si l'on veut qu'elle produise un effet équivalent à celui d'une atmosphère quand il y a condensation. La machine porte alors le nom de *machine à haute pression*; on réserve le nom de *machine à basse pression* à celle dans laquelle la tension de la vapeur de la chaudière est au-dessous de deux atmosphères; alors il y a toujours un condenseur.

Les machines à haute pression sans condensation sont plus simples que les machines à basses pressions; il y a de moins, le condenseur avec sa pompe d'alimentation et sa pompe à air, ainsi que toutes les pièces, tringles, robinets tuyaux... qui dépendent de ces parties. C'est ce qui fait préférer aujourd'hui généralement les machines à haute pression; elles occupent moins de place, sont moins coûteuses, à égalité de force dépensent moins de combustible, et n'exigent pas la grande quantité d'eau nécessaire à la condensation. Cependant ces machines sont souvent accompagnées d'un condenseur; on épargne alors une atmosphère de pression.

Papin est le premier qui ait établi une machine sans condensation. Il ne paraît pas que Watt en ait construit. On donne aujourd'hui à la vapeur une tension qui varie de 3 à 8 atmosphères; en Amérique, on va même jusqu'à 10.

1000. Différents systèmes de machines fixes. — La machine de Watt à condensation est d'un poids énorme et occupe un grand espace. Le balancier et le système qui sert à le soutenir sont surtout d'une installation difficile et coûteuse. On a cherché, dès le principe, des dispositions plus simples, et il y a un très grand nombre de modèles différents de machines à vapeur. Nous ne pouvons donc songer à en donner ici une description même abrégée. Nous remarquerons seulement que toutes les machines fixes, si différentes dans les détails, peuvent se rapporter à trois types principaux: la *machine de Watt* déjà décrite (998), la *machine Maudslay* et la *machine à cylindre oscillant*. Ces trois systèmes diffèrent principalement par la manière dont le mouvement du piston se communique au volant.

Machine Maudslay. — La *fig.* 735 représente une machine de ce système, sans condensation : C est le corps de pompe ; la tige du piston est guidée par deux galets fixés aux extrémités d'une traverse *t* qui la termine, et roulant dans deux *glissières* fixes *c*, *c'* parallèles à la tige. Deux bielles pendantes *cn*, *c'n*, articulées avec la traverse *t*, attaquent en *n*, *n* les deux manivelles que porte l'arbre O du volant. La vapeur arrive par le tuyau V, dans la boîte à vapeur. Le tiroir est mis en mouvement par l'excentrique *e*, le levier coudé *o* et la traverse *r* que porte à son extrémité la tige de ce tiroir. *i* est la pompe d'alimentation de la chaudière ; elle est mise en jeu par l'excentrique *e*, qui fait osciller, par l'intermédiaire d'une bielle *b*, un levier du troisième genre, qui ne se voit pas dans la figure, et dont l'extrémité opposée au point d'appui agit sur les deux bielles pendantes *c*. Le modérateur à force centrifuge R reçoit son mouvement de rotation, de l'arbre du volant, au moyen d'une corde sans fin qui passe sur deux poulies de renvoi β. L'anneau *a* soulève plus ou moins la tringle à fourchette *a*α, qui glisse dans un anneau fixe α, et agit par son extrémité inférieure sur la clef placée dans le conduit de vapeur V.

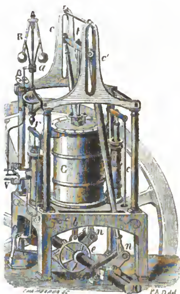


Fig. 735.

Ce système présente une élégante simplicité quand le corps de pompe est horizontal, et la bielle dans le prolongement de la tige. C'est cette disposition qu'on adopte dans les locomotives des chemins de fer. On en voit aussi un exemple dans la *fig.* 743.

Machines à cylindre oscillant. — M. Manby est parvenu à lier directement la tige du piston à la manivelle de l'arbre du volant, en donnant au corps de pompe la liberté d'osciller dans un plan perpendiculaire à cet arbre. Pour cela, ce corps de pompe est soutenu sur des colonnes, par deux tourillons, dont l'un se voit en *o* (*fig.* 736), autour desquels il peut osciller. La tige du piston agit directement sur la manivelle *m* ; elle est guidée par des galets qui roulent entre deux tiges *c*, *c'*, fixées au couvercle du corps de pompe. La vapeur arrive par l'un des tourillons, qui est foré, et dans lequel s'engage l'extrémité d'un tuyau communiquant avec la chaudière à vapeur ; une garniture d'étoupes

permet au tourillon de tourner sur lui-même sans qu'il y ait perte de vapeur.

La distribution se fait de différentes manières. Dans les appareils de petites dimensions, on emploie souvent une espéce de robinet à quatre voies, dont le corps est formé par l'extrémité du tourillon, qui présente une forme conique et est reçu dans un boisseau fixe, dans lequel il tourne alternativement, pendant les oscillations du corps de pompe.

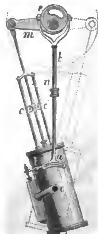


Fig. 736.

Dans les appareils de grandes dimensions, on emploie des tiroirs mis en mouvement par différents moyens. Voici un des plus simples : l'excentrique *e* (*fig.* 736) fait monter et descendre une bielle *b* guidée en *n* et portant une glissière *a*, ayant la forme d'un arc dont le centre est en *o*. Le levier *l* qui agit sur la tige du tiroir, porte un bouton qui glisse dans la glissière pendant les oscillations du piston. Le tiroir ne changerait pas de position si la glissière *a* restait fixe ; mais comme elle monte et descend alternativement par l'effet de l'excentrique *e*, le tiroir reçoit un mouvement alternatif. La vapeur arrive dans la boîte de distribution par un des tourillons et sort par l'autre. La pompe d'alimentation est mise en mouvement par un second excentrique adapté à l'arbre du volant.

Les machines oscillantes, imaginées en Angleterre par M. Manby, et importées en France par M. Cavé, n'ont pas tenu ce qu'on semblait devoir en attendre. L'usure rapide des tourillons, sur lesquels porte le poids du cylindre et tout l'effort de la machine, les a fait assez généralement abandonner, surtout pour les appareils de grandes dimensions.

Machines rotatives. — Pour supprimer la perte de travail, due à la transformation du mouvement alternatif en mouvement de rotation, on a cherché à construire des machines à rotation directe, c'est-à-dire dans lesquelles la vapeur imprime directement un mouvement de rotation à un arbre. Les premiers essais ont été faits par Watt, et, depuis, divers inventeurs ont donné des solutions très ingénieuses de ce probléme. M. Pecqueur est le premier qui ait exécuté des machines rotatives que l'industrie ait pu employer ; mais elles n'ont pas été généralement adoptées. Le principal défaut qu'on leur trouve est de dépenser plus de vapeur, à égalité de puissance, que les machines à mouvement alternatif.

1001. Machines à détente. — Watt ayant remarqué que, dans certains cas, la vitesse du piston allait en s'accélérant, ce qui produisait une secousse au moment où il devait changer de sens dans son mouvement, imagina, pour obvier à cet inconvénient, de ne laisser entrer la vapeur dans le corps de

pompe que pendant une partie seulement de la course du piston. La vapeur introduite agit ensuite par sa force de ressort ou par *détente*, avec une force décroissante, qui dépend de l'augmentation de volume qu'elle éprouve, et que l'on peut calculer approximativement, pour chaque position du piston, en appliquant la loi de Mariotte. Watt ne laissait entrer la vapeur que pendant le tiers environ de la course du piston. Indépendamment de la régularité de mouvement obtenue par ce moyen, il y a une économie des deux tiers de la vapeur, ou du combustible. Cette économie est, en partie, au détriment du travail produit; mais la perte est loin d'être proportionnelle à l'économie de vapeur. Par exemple, si la vapeur n'entre que pendant le tiers ou $\frac{2}{6}$ de la course du piston, elle agira avec la pression P, qui règne dans la chaudière, pendant $\frac{2}{6}$ de cette course, et pendant les sixièmes de course qui suivront elle agira avec des pressions égales successivement à $P\frac{2}{3}$, $P\frac{2}{4}$, $P\frac{2}{5}$, $P\frac{2}{6}$, si l'on applique la loi de Mariotte, et si l'on néglige les variations de pression pendant chaque sixième. En prenant la moyenne entre ces différentes pressions et la pression P qui existe pendant les deux premiers sixièmes, on trouve $P\frac{3,9}{6} = 0,63P$, quantité plus grande que $\frac{1}{3}P = 0,333P$. En n'employant qu'un tiers de vapeur, on a donc une pression moyenne qui est bien supérieure au tiers de P; on obtiendrait une valeur plus grande encore, si l'on multipliait les subdivisions de la course pendant lesquelles on suppose la pression constante. — On peut encore reconnaître l'avantage de la détente en observant que si la vapeur n'entre que pendant $\frac{1}{n}$ de la course du piston, elle produit d'abord $\frac{1}{n}$ du travail qui serait effectué si elle entrait pendant toute la course, et l'on dépense n fois moins de vapeur. On gagne ensuite tout le travail effectué par la détente.

Manière de produire la détente. — Watt arrêtait l'arrivée de la vapeur dans le corps de pompe en fermant, au moyen d'une cheville adaptée à la tige de la pompe à air, la soupape d'entrée de son système de distribution à boîte à soupapes (995). Aujourd'hui, on emploie d'autres moyens: tantôt on se sert d'une soupape placée dans le tuyau d'arrivée de la vapeur et qui se ferme, par l'effet d'un excentrique, quand le piston a parcouru une certaine partie de sa course; tantôt on se sert d'un second tiroir, nommé tiroir à recouvrement. glissant au-dessus de celui qui règle l'introduction de la vapeur, et placé soit dans la même boîte, soit dans une boîte séparée; ce tiroir à recouvrement laisse passer ou intercepte la vapeur qui se rend au second. Enfin, on peut encore n'employer qu'un seul tiroir à coquille, mais il faut le faire mouvoir au moyen d'un excentrique dont la courbure soit calculée de manière à pousser le tiroir avec des vitesses variant suivant une loi convenable.

Détente Clapeyron. — M. Clapeyron est parvenu à régler la détente avec un seul tiroir et au moyen d'un excentrique circulaire. Le tiroir (*fig.* 737) porte deux plaques α, β qui peuvent tenir fermées les ouvertures par lesquelles arrive la vapeur, pendant un temps plus ou moins long; de manière que la

communication c, par exemple, soit fermée pendant que c′ communique avec le condenseur par l'ouverture o. Cette ouverture est très large et peut être en partie recouverte sans inconvénient, comme on le voit dans la figure. Alors la détente se fait au-dessus du piston, pendant que le tiroir monte. Le moment où le canal c est obstrué dépend de la dimension des plaques α et β, et de la distance αβ; elle dépend aussi de l'amplitude des déplacements du tiroir.

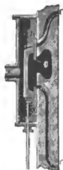


Fig. 737.

1002. Détente variable. — Il y a un grand avantage à pouvoir faire varier l'étendue de la détente d'après les différentes résistances que doit vaincre la machine. On emploie pour cela divers moyens : tantôt on dispose de l'amplitude des mouvements d'un tiroir à recouvrement, tantôt on modifie l'excentrique qui fait jouer une soupape de détente. Le plus souvent on fait varier l'amplitude du mouvement alternatif d'un tiroir unique, au moyen d'une disposition qui permet de faire varier à volonté la détente, même pendant la marche de la machine : *t* (*fig.* 738) est la tige du tiroir, guidée dans un anneau *a*, et mise en mouvement par une bielle B. Cette bielle porte un bouton *b*, qui s'engage dans une glissière *cc* articulée en O, de manière qu'elle peut obéir à la bielle B′ de l'excentrique *e*. L'amplitude des mouvements du tiroir dépend de la distance O*b*. On peut faire varier cette distance au moyen de la barre articulée *l* et du levier coudé *o*, sur lequel on agit au moyen du levier L. Ce levier porte un

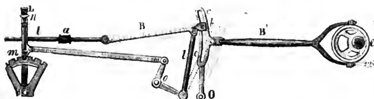


Fig. 738.

verrou *n* que l'on enfonce dans un des crans que porte un arc métallique *m*, de manière à maintenir le bouton *b* à une distance déterminée du point O. Dans certaines machines, la détente variable est réglée par le régulateur à force centrifuge, qui agit sur la barre *l*, de manière que la durée de l'entrée libre de la vapeur soit d'autant plus petite que la machine tend à marcher plus vite.

Machines à détente de Woolf. — Dans les machines de Woolf, la détente se fait dans un second corps de pompe P′ séparé du premier, et de

plus grandes dimensions (*fig.* 739). La partie inférieure de l'un des corps de pompe communique avec la partie supérieure de l'autre, et réciproquement. La vapeur entre librement dans le corps de pompe P, et après avoir agi sur le piston qu'il contient, elle passe dans l'autre corps de pompe, où elle presse par détente le piston P', qui est plus grand que P. Des tiroirs à pistons, mobiles dans les tuyaux *ab*, *a'b'*, servent à régler l'introduction de la vapeur. Dans la position de la figure, les deux tiroirs sont soulevés par les tiges *t*, *t'* ; la vapeur arrive par l'ouverture *o* et passe au-dessus du piston P, tandis que celle qui se trouve au-dessous de ce piston se précipite au-dessus du piston P', et le presse par sa détente. Pendant ce temps-là, le dessous du piston P' communique avec l'air extérieur, ou avec un condenseur, par l'ouverture *c'*. Quand les deux pistons P, P' sont arrivés au bas de leur course, les tiges *t*, *t'* s'abaissent, et les tiroirs prennent les positions indiquées en lignes ponctuées. Alors la vapeur arrivant en *o* passe sous le piston P, et celle qui se trouve au-dessus, passe sous le piston P', pour le soulever par sa détente, pendant que le dessus de ce dernier piston communique avec l'extérieur, ou avec le condenseur, par l'ouverture *c*. Les pistons P et P' sont fixés à l'extrémité d'un balancier, par l'intermédiaire d'un même parallélogramme articulé, en deux points placés sur une ligne droite qui passe par l'axe du balancier et par l'angle opposé du parallélogramme (994). Les machines de Woolf, d'abord peu employées, commencent à jouir d'une faveur qu'elles doivent à l'économie notable de combustible qu'elles permettent de réaliser.

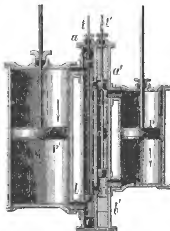


Fig. 739.

1003. DU TRAVAIL DES MACHINES A VAPEUR. — Le nombre de *kilogrammètres* (I, 73) fournis par une machine à vapeur, pendant un temps donné, peut se mesurer au moyen du frein de De Prony (I, 74), que l'on applique à l'arbre du volant. Ce travail s'évalue le plus ordinairement au moyen du *cheval-vapeur*, unité employée pour la première fois par Savery. Nous avons vu (I, 73) qu'elle représente 75 kilogrammètres par seconde, et qu'il faut disposer de 5,5 chevaux vivants pour fournir en 24 heures le travail d'un cheval-vapeur. Le travail des machines à vapeur peut aussi se calculer théoriquement quand on connaît les dimensions du corps de pompe et la tension de la vapeur.

Calcul du travail du piston. — Supposons d'abord que la machine marche à *pleine vapeur*, c'est-à-dire qu'il n'y ait pas détente. Désignons par S

la surface du piston, par H l'excès de la pression de la vapeur dans le corps de pompe sur sa tension dans le condenseur ou dans l'atmosphère, suivant que la machine est à condensation ou sans condensation; et par l le chemin parcouru par le piston en 1ˢ. Le travail accompli pendant ce temps, sera SHl(I,73), ou bien VH, en représentant par V le volume Sl. V étant exprimé en décimètres cubes, et H en décimètres d'eau, le produit VH représentera le nombre de kilogrammètres fournis en 1ˢ.



Fig. 740.

Dans les machines à détente, pour obtenir le travail accompli pendant une course du piston, il faut ajouter au travail effectué pendant que la vapeur entre librement, celui qui s'accomplit pendant la détente. Le premier est égal à SlH, en appelant l l'espace parcouru à pleine vapeur par le piston. Si nous prenons sur l'axe Ox (*fig.* 740) une longueur OB représentant la valeur de l, et l'ordonnée Bh égale à la pression H, l'aire Hl du rectangle Oh, multipliée par S, représentera le travail accompli pendant le parcours de l'espace l.

Pour obtenir le travail fourni pendant la détente, supposons d'abord que le vide soit fait complètement dans le condenseur, et soit OA la longueur L du corps de pompe. $BA = l'$ sera l'espace parcouru par le piston pendant la détente. Divisons cet espace en un nombre n de parties égales Ba, ab, bc..., et supposons que les pressions de la vapeur soient constantes pendant que le piston les parcourt; représentons ces pressions par Bh, aa', bb', cc'... Les travaux accomplis dans ces subdivisions, seront représentés par les aires des rectangles Ba', ab', bc'... multipliées par S, et le travail de la détente à la fin de la course du piston, par la somme de ces aires; c'est-à-dire, en supposant n infini, par l'aire BAA'h. Pour obtenir les pressions aa', bb', cc', supposons que la vapeur se dilate en suivant la loi de Mariotte, et soit y la pression pour une distance au point O égale à x; on aura $xy = \text{OB} \times \text{B}h = l\text{H}$, d'où l'on tirera la valeur de y. Cette expression est aussi l'équation de la courbe hA'. On voit que cette courbe est une hyperbole équilatère rapportée à ses asymptotes Ox et Oy. Il suffira donc, pour calculer le travail correspondant à une course du piston, dans les machines à condensation, d'ajouter au rectangle Oh, l'aire comprise entre l'hyperbole équilatère, son asymptote Ox et les deux ordonnées correspondantes aux valeurs $x = l$, $x = \text{L}$; l'équation de cette hyperbole étant $xy = l\text{H}$.

Quand la machine marche sans condensation, on évalue par le même moyen le travail du piston; mais il faut prendre pour ordonnées les différences entre la pression atmosphérique et la pression de la vapeur calculée par la formule $xy = l\text{H}$. Dans ce cas, l'axe des x est une parallèle à l'asymptote.

Pour représenter le travail par une expression analytique, on calcule algébriquement les aires O*h* et BAA'*h*, et on les ajoute. On trouve ainsi, dans le cas où il n'y a pas condensation, et en représentant par P la pression atmosphérique en colonne d'eau, et par y' la pression à la fin de la détente, donnée par l'égalité $Lx = lH$,

$$sHl\left(1 + \log\frac{L}{l} - \frac{P}{y'}\right) \qquad \text{et} \qquad sHl\left(1 + \log\frac{L}{l}\right),$$

quand il y a condensation et qu'on suppose le vide complet dans le condenseur. Les logarithmes sont pris dans le système Népérien.

Voici le tableau du travail d'une même masse de vapeur, quand la détente se fait après que le piston a parcouru 9, 8, 7..... dixièmes de sa course ; le travail à pleine vapeur est pris pour unité :

FRACTION de la course où commence la détente.	TRAVAIL produit.	FRACTION de la course où commence la détente.	TRAVAIL produit.
1	1,000	0,5	1,693
0,9	1,105	0,4	1,916
0,8	1,223	0,3	2,204
0,7	1,357	0,2	2,609
0,6	1,509	0,1	3,302

1004. Indicateur de Watt. — Watt a imaginé un petit appareil, notablement perfectionné par M. Combes, qui fait connaître la pression dans le corps de pompe pour chaque position du piston, et par suite la marche que suit la détente; de manière qu'on peut calculer ensuite le travail effectué à la fin de la course. L'*indicateur* consiste en un petit corps de pompe contenant un piston *p* (*fig.* 741), et que l'on visse sur le couvercle du corps de pompe de la machine. Quand la vapeur arrive dans la partie supérieure de ce dernier corps de pompe, elle soulève le piston *p* en faisant céder un ressort en hélice qui entoure sa tige *t*. Cette tige porte un crayon articulé *r*, qui monte et descend en même temps qu'elle. Ce crayon est pressé par un ressort contre un tambour vertical A, sur lequel on étend une feuille de papier, dont les deux bords extrêmes sont maintenus par deux lames à ressort *l*, *l'*. Quand la vapeur soulève le piston *p*, le crayon trace un trait vertical sur le tambour A, s'il est fixe. Mais ce tambour tourne sur lui-même pendant l'ascension du piston de la machine à vapeur; un cordon *c* fixé vers le haut de la tige de ce piston tirant sur une poulie C, à laquelle est adapté un petit treuil, autour duquel s'enroule un second cordon qui embrasse le tambour A. Il résulte de cette disposition

que ce dernier tourne avec une vitesse à chaque instant proportionnelle à celle du piston de la machine. Et, en vertu de ce mouvement, combiné avec celui du crayon *r*, ce dernier trace une courbe. Enfin, un ressort en spirale, contenu dans le tambour, le fait retourner sur ses pas quand le cordon *c* descend avec le piston de la machine. On voit en *n*, dans la *fig*. 734 (p. 401), l'indicateur placé sur la machine de Watt, et en K le point d'attache du cordon qui fait tourner le tambour.

Cela posé, prenons sur une ligne horizontale une longueur *ab* (*fig*. 741), égale à l'arc décrit par un point du tambour A pendant l'ascension du piston de la machine, et supposons que cette ligne soit celle que trace le crayon quand le piston *p* est soumis de chaque côté à la pression atmosphérique. Soit aussi *om* celle que décrirait le crayon s'il y avait le vide parfait sous le piston *p*. Lorsque la vapeur entrera librement dans la partie supérieure du corps de pompe de la machine, elle amènera le piston *p* dans une position où il y aura équilibre entre l'effort qu'elle exercera et la résistance du ressort en hélice; et, le tambour A tournant, la pointe *r* marquera un trait horizontal. A partir du moment où la vapeur cessera d'entrer et où commencera la détente, le ressort en hélice fera descendre le piston *p*, le crayon s'abaissera et décrira une courbe dont les ordonnées, dépendantes des pressions, iront en diminuant. Quand l'appareil reviendra ensuite sur ses pas, le crayon décrira une droite, placée au-dessous de *ab* s'il y a condensation, et se confondant avec *ab* dans le cas contraire. Dans le premier cas, cette droite est au-dessus de *om*, puisque le vide n'est jamais parfait.

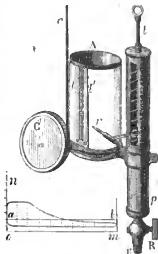


Fig. 741.

Le chemin parcouru par le piston étant proportionnel aux distances comptées sur *ab*, et la pression efficace de la vapeur, aux différences des ordonnées de la courbe comptées à partir de *om*, on voit que le travail accompli pendant une double course du piston sera représenté par l'aire de la courbe fermée décrite par le crayon ; ce qui a fait donner à l'instrument le nom de *totalisateur*.

Le travail effectif du piston ainsi mesuré n'est pas égal au travail théorique, la vapeur ayant dans le cylindre, une tension plus petite que dans la chaudière, à cause des résistances qu'elle éprouve dans les tuyaux et dans la boîte à vapeur où elle suit une route sinueuse. Il résulte de là que les dimensions relatives et la forme de ces différentes parties ont une grande influence sur le travail du piston. Il faut que la vapeur puisse entrer librement, par de larges

ouvertures. On donne ordinairement aux conduits qui l'amènent une section de $\frac{1}{25}$ au moins de celle du corps de pompe. Il ne faut pas cependant que cette section soit trop grande, car la vapeur qui reste dans les conduits, à partir de la boîte de distribution, est perdue sans produire d'effet.

1005. Rendement des machines à vapeur. — Le travail effectif du piston est toujours beaucoup plus grand que celui qu'on trouve à l'arbre du volant, au moyen du *frein* de De Prony (I, 74). Cela tient aux pertes occasionnées par les résistances passives de la transmission du mouvement, et au travail absorbé par le jeu des pompes destinées au service de la machine. Il faut donc atténuer autant que possible, par un ajustement soigné et par le graissage, les frottements des différentes pièces. Le volant ne doit pas être trop lourd, à cause du frottement dans ses coussinets; il vaut mieux diminuer sa masse, tout en lui donnant un plus grand rayon pour lui conserver le même *moment d'inertie*. Quand les résistances qu'une machine a à vaincre sont sujettes à varier notablement, comme lorsqu'elle est employée à faire marcher des trains de laminoirs, l'arbre sur lequel elle agit porte une roue dentée qui commande un pignon adapté à l'arbre du volant. On supplée ainsi à la masse du volant en lui donnant une grande vitesse; et il constitue alors un véritable réservoir de force qui est utilisée au moment des grandes résistances.

Pour avoir le rendement, il faut diviser le travail du piston par celui que l'on trouve à l'arbre du volant. Ordinairement, au lieu de se servir du travail effectif du piston, on emploie le travail théorique donné par la formule (1003). On trouve ainsi que les machines à basses pressions de 10 à 100 chevaux donnent de 0,40 à 0,60 d'effet utile. Les machines à haute pression, marchant sous 5 atmosphères avec une détente de $\frac{1}{3}$ et sans condensation, donnent le meilleur rendement.

Tout ce qui tend à simplifier les différentes pièces des machines à vapeur augmente leur *rendement*; c'est là le but vers lequel tendent aujourd'hui les constructeurs, en même temps qu'à diminuer le volume, le poids et par suite le prix de ces appareils. De grands progrès ont été réalisés, dans ces dernières années, au moyen de machines à haute pression à cylindre horizontal disposé comme celui de la *fig.* 743. M. Flaud en a construit dont les dimensions sont étonnamment réduites, eu égard au travail qu'elles fournissent, en appliquant l'idée, émise par M. Giffard, d'augmenter la vitesse du piston pour suppléer à ses moindres dimensions. Comme exemple, nous citerons une machine de la force de 3 chevaux, à 4 atmosphères. Cette machine, comparée à une autre de même force et placée dans les mêmes conditions, ne coûte que 1000 fr. au lieu de 3600 fr.; n'occupe que 0,55 mètres cubes, au lieu de 16; ne pèse que 60 kil. au lieu de 1800, et ne dépense que les deux tiers du combustible; mais aussi elle donne 600 coups de piston par minute, au lieu de 100. Citons encore une machine de 20 chevaux ne pesant que 1800 kil. et ne coûtant que 5000 fr.; tandis qu'une machine de même force, dans le système ordinaire, coûte de 16 à 18000 fr.

1006. IMPORTANCE INDUSTRIELLE DES MACHINES A VAPEUR. — Indépendamment des applications au mouvement des navires et aux transports rapides sur les chemins de fer, les machines à vapeur, en fournissant un moteur économique [1], doué d'une puissance qui dépasse tout ce qu'on peut produire au moyen des autres forces, ont permis de mener à bonne fin des entreprises inabordables sans leur secours, surtout dans les localités où l'on n'a pas à sa disposition des cours d'eau, et où il faudrait employer la force des chevaux. Par exemple, on entreprit, vers 1825, d'exploiter des mines de sel dans le département de la Meurthe; les eaux qui pénétraient dans la mine étaient extraites au moyen de pompes mises en mouvement par un manége à 24 chevaux. Ces animaux avaient à faire de tels efforts qu'ils ne pouvaient travailler qu'une heure par jour, et qu'on en voyait souvent tomber morts subitement. Il fallait donc avoir chaque jour 576 chevaux disponibles; et après des travaux dispendieux, la profondeur de la mine augmentant ainsi que l'abondance des eaux, on fut obligé de renoncer à l'entreprise. Or, un moteur à vapeur de la force de 20 chevaux aurait suffi pour vider la mine.

Marteau à vapeur. — Cette machine, imaginée par M. Schneider, au Creusot, va nous donner un nouvel exemple des résultats immenses que l'on peut obtenir avec la vapeur. Le *marteau à vapeur* ou *marteau pilon* consiste en un mouton en fonte P (*fig.* 742) pouvant peser jusqu'à 8000 kilos, suspendu à la tige d'un piston qui se meut dans un corps de pompe C, dont on voit la coupe en C'. Ce mouton est guidé dans sa course verticale par deux coulisses latérales. L'extrémité inférieure de la tige du piston est garnie de matières élastiques *c*, destinées à amortir la secousse au moment du choc. Enfin, un ressort en hélice enveloppe la tige pour empêcher le choc du mouton, quand il monte, contre le fond du corps de pompe. Au reste une couronne de trous pratiquée à la partie supérieure du corps de pompe laisse échapper la vapeur dès que le piston la dépasse. Pour faire marcher cette machine, on soulève le tiroir *o* au moyen de la tige *b*, en agissant sur le levier *l*. La vapeur qui arrive à haute pression par le tube *v*, *v'* soulève le piston ainsi que la masse P.

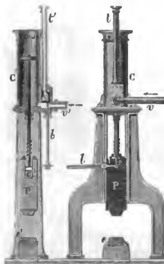


Fig. 742.

[1] A Paris, le travail d'une machine à vapeur, il y a vingt-cinq ans, avant les derniers perfectionnements, coûtait déjà cinq fois moins que le même travail fourni par des chevaux.

On abaisse ensuite le tiroir *o*, la vapeur s'échappe par la cheminée *t'*, *t*, le mouton retombe et vient battre sur l'enclume *e*, *e'*, avec d'autant plus de force qu'il a été soulevé davantage. La course du marteau peut aller jusqu'à 1^{m}. Au moyen de cet appareil, l'on forge et l'on soude avec facilité les plus grosses pièces de fer.

Quand on veut obtenir une suite rapide de coups, on peut produire le mouvement alternatif du tiroir au moyen de deux mentonnets fixés au mouton, et qui agissent sur le levier *l* quand le piston arrive aux limites inférieure et supérieure de sa course. Le *marteau à pilots* n'est autre chose que le marteau à vapeur appliqué à enfoncer les pilots, pour les constructions. Dans ce cas, l'appareil est porté par le pilot même que l'on veut enfoncer, de manière qu'il descend avec lui. Le tuyau qui amène la vapeur est articulé de manière à se

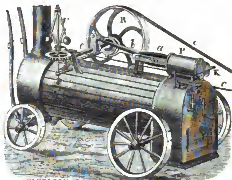


Fig. 743.

prêter à cet abaissement. L'économie de temps et d'argent résultant de l'emploi de cette machine est considérable. Dans la construction d'un dock à Devonport, en Angleterre, l'emploi du marteau à pilot a fait économiser deux années de temps, et une somme de 1.250,000 francs. On enfonçait jusqu'à 32 pilots à une profondeur de 9^{m} à 12^{m}, dans l'espace de 10 heures. L'appareil donnait 60, 70 et même 80 coups par minute. Un seul coup enfonçait souvent un pilot de 5 à 6 mètres, et la tête du pilot était si peu endommagée qu'on pouvait se dispenser de la garnir d'un cercle en fer.

Machines locomobiles. — Depuis quelques années, on construit des machines montées sur des roues, que l'on peut transporter dans les localités où l'on a besoin momentanément de force, comme dans les chantiers de travaux hydrauliques ou autres. Ces machines portent le nom de *machines locomobiles* ; on les emploie beaucoup aujourd'hui dans les travaux agricoles, par exemple pour faire marcher des appareils à battre le blé. On vient, dans plusieurs grandes villes, de les appliquer d'une manière très heureuse, à faire marcher des pompes à incendie d'une puissance prodigieuse.

La *fig*. 743 représente une de ces machines : P est le corps de pompe. La tige du piston, guidée dans une glissière *a*, agit, par l'intermédiaire de la bielle *b*, sur la manivelle de l'arbre *o*. Cet arbre porte une grande poulie R, embrassée par une courroie sans fin *cc*, qui transmet le mouvement aux appareils à mouvoir. *r* est le modérateur à force centrifuge réglant la position de la clef K. La vapeur vient de la chaudière placée au-dessous de tout le mécanisme ; elle est disposée comme celle des locomotives des chemins de fer, que nous décrirons plus loin.

1007. Machines à vapeurs combinées. — La chaleur abandonnée par la vapeur dans le condenseur des machines à basse pression est entièrement perdue, sauf la petite portion qui retourne à la chaudière avec l'eau d'alimentation. On a cherché à utiliser une partie de cette chaleur perdue, en l'employant à vaporiser un liquide beaucoup plus volatil que l'eau, comme l'*éther*, le *chloroforme*, le *sulfure de carbone*. Voici comment est disposée la machine à vapeurs combinées de M. Dutrembley. La vapeur d'eau sortant du corps de pompe, se rend dans un condenseur complètement clos, que traversent verticalement un grand nombre de tubes aplatis en cuivre, très rapprochés les uns des autres. La partie inférieure de ces tubes communique avec un réservoir, placé au-dessous du condenseur, et rempli d'éther qui s'élève à une certaine hauteur dans les tubes. Ce système constitue l'appareil vaporisateur. La vapeur d'eau en circulant autour des tubes, se condense et abandonne de la chaleur qui vaporise l'éther. La vapeur d'éther passe dans un corps de pompe semblable à celui dans lequel agit la vapeur d'eau, mais un peu plus grand, et y pousse un piston qui agit sur l'arbre de la machine ; de manière que le travail de la vapeur d'éther s'ajoute à celui de la vapeur d'eau. La vapeur d'éther, à sa sortie du corps de pompe, se rend dans des tubes semblables à ceux de l'appareil vaporisateur, autour desquels passe un courant d'eau froide, et dans lesquels elle se condense. Une pompe foulante repousse l'éther régénéré, dans le réservoir inférieur de l'appareil vaporisateur. Quant au liquide provenant de la condensation de la vapeur d'eau autour de ce dernier appareil, il est pris par une pompe qui le refoule dans la chaudière, rendant ainsi à celle-ci la chaleur qui n'a pas été employée à vaporiser l'éther.

Un appareil semblable, de la force de 70 chevaux, a été établi sur un bateau à vapeur par M. Dutrembley. Il résulte d'un rapport publié par M. l'ingénieur Montet, à la suite d'expériences faites sur cet appareil, que l'économie de combustible, lorsque la machine marche avec les deux vapeurs combinées, est de 70 pour cent de la quantité consommée quand la vapeur d'eau agit seule dans les deux cylindres. Les craintes que l'on aurait pu concevoir à cause de l'extrême inflammabilité de l'éther, s'évanouissent quand on considère que la perfection des joints est poussée à un degré tel que c'est à peine si l'on sent une légère odeur d'éther au moment où la machine va être mise en mouvement. D'ailleurs, une expérience assez longue prouve que, pour les machines fixes, l'éther ne présente pas de danger quand on prend les précautions convenables.

Une machine de la force de 50 chevaux fonctionne à Lyon depuis plus de 12 ans, sans qu'aucun accident se soit produit. Au reste, le chloroforme, dont la vapeur n'est pas inflammable, peut remplacer l'éther. Une machine de 20 chevaux, à chloroforme, construite par M. Lafont, a été employée pendant quatre ans aux travaux du port de Lorient et a donné de très bons résultats. Une machine plus puissante, dans le même système, a depuis été établie à bord d'un petit navire, *le Galilée*.

1008. Machines à vapeur surchauffée. — Au lieu d'introduire dans un corps de pompe, de nouvelle vapeur à chaque coup de piston, on a imaginé de réchauffer la vapeur qui a déjà servi, de manière à augmenter sa force expansive, et de la conduire de nouveau dans le corps de pompe. On économise ainsi la chaleur latente qu'aurait exigée la formation d'une nouvelle quantité de vapeur. M. Séguin aîné s'est occupé de cette question dès 1838, et M. Siemens a construit un appareil de la force de 40 chevaux, dans lequel la vapeur, après avoir poussé le piston, passe dans deux petits cylindres où elle reçoit d'un foyer une quantité de chaleur égale à celle qu'elle a perdue. Cette vapeur est alors de nouveau introduite dans le corps de pompe. On voit que la même vapeur sert constamment et qu'il n'en faut fournir qu'une quantité égale à celle qui se perd; aussi, d'après l'inventeur, cette machine ne dépenserait-elle que $\frac{1}{6}$ du combustible nécessaire à une machine ordinaire de même puissance.

II. Chaudières à vapeur.

1009. Une machine à vapeur peut être considérée comme composée de deux parties principales: l'une, que nous avons fait connaître pour les machines fixes, est composée des appareils que la vapeur fait mouvoir; l'autre est destinée à engendrer cette vapeur. Cette dernière se compose de la chaudière ou *générateur à vapeur*, avec les appareils qui en dépendent, et du fourneau destiné à l'échauffer. La portion de la surface de la chaudière, atteinte directement par la flamme du foyer ou par les gaz chauds qui s'en dégagent, se nomme *surface de chauffe*.

Les chaudières à vapeur se font en tôle, quelquefois en cuivre. On commence à en fabriquer en acier fondu, qui résistent beaucoup mieux que les chaudières en tôle. On en voyait une à l'exposition universelle de Paris, de 5^m de long et de 1^m de diamètre, essayée à 15 atmosphères, et dont les parois n'avaient que 6^{mm} d'épaisseur; tandis que les parois d'une chaudière en tôle de mêmes dimensions auraient du avoir 13^{mm}, pour résister à la même pression.

La forme des générateurs à vapeur est très variable. Dans les machines à basse pression on leur donne assez souvent la forme d'un hémisphère ou d'un demi-cylindre horizontal; avec un fond concave en dessous. La forme la plus

convenable est celle d'un cylindre terminé par deux hémisphères. La capacité étant alors maximum, la tension de la vapeur ne peut, en modifiant la forme, produire des déchirures par flexion. La pression n'agit donc que par traction, et nous savons que c'est aux efforts exercés de cette manière que les corps résistent le plus facilement. Nous avons vu (I, 448) qu'une chaudière cylindrique, pour résister à une pression de P atmosphères, doit avoir une épaisseur donnée par la formule $e = PR : t$, dans laquelle t est le coefficient de ténacité de la substance, R le demi-diamètre, et P la pression en kilogrammes sur un centimètre carré. L'épaisseur qu'on donne aux chaudières est telle qu'elles peuvent résister à froid à une pression dix fois plus grande que celle qu'elles doivent supporter de la part de la vapeur. On les essaie en y comprimant de l'eau au moyen d'une presse hydraulique. Une ordonnance de 1828 prescrit de donner aux chaudières en tôle une épaisseur minimum indiquée par la formule $e = \frac{1}{10000}[36R(H-1)+3000]$, dans laquelle e et R sont exprimés en centimètres, et la pression H, en atmosphères. La valeur ainsi calculée représente l'épaisseur avec laquelle la chaudière résisterait à une pression égale à dix fois celle de la vapeur, à laquelle épaisseur on ajouterait 3^{mm}. On dépasse toujours cette valeur, dans la pratique.

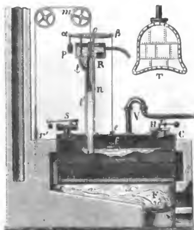


Fig. 744.

1010. Chaudières à tombeau. — La *fig.* 744 représente une chaudière à basse pression, connue sous le nom de *chaudière à tombeau*. Elle est vue, en T par l'une de ses extrémités, et en Cc par le côté. V est le tuyau par lequel la vapeur se rend au corps de pompe de la machine. En *s* sont des appareils de sûreté, sur lesquels nous reviendrons (1013). En H est une large ouverture, nommée *trou d'homme*, fermée par un couvercle disposé comme celui d'une marmite autoclave (952); elle est destinée à l'introduction d'un ouvrier dans la chaudière, pour la nettoyer quand elle est vide et froide. La soupape *r*, qui s'ouvre de dehors en dedans, laisse rentrer l'air quand on fait refroidir la chaudière, qui, sans cette précaution, pourrait être déformée par la pression atmosphérique, après la condensation de la vapeur. La combustion dans le foyer F est réglée par la vapeur même, au moyen d'une disposition ingénieuse : un registre *r'* est soutenu par un cordon *m*, qui passe sur deux poulies de renvoi, et s'attache à un flotteur *n* qui suit le niveau de l'eau dans le tuyau *t'*. Ce tuyau s'enfonce dans l'eau de la chaudière, et le poids de la colonne d'eau

qu'il contient représente l'excès de la pression de la vapeur sur celle de l'atmosphère. La longueur du cordon *m* est telle que le registre laisse complétement libre le passage de la fumée, quand la vapeur possède la tension désirée. Mais si cette tension augmente, la colonne d'eau *t'* s'élève et le flotteur montant, la plaque *r'* ferme en partie le passage de la fumée, ce qui diminue le tirage et ralentit la combustion.

Alimentation. — Pour renouveler l'eau des chaudières à basse pression, on emploie souvent, au lieu de pompe foulante, la disposition suivante. Une partie de l'eau du condenseur est poussée dans un réservoir R, d'où elle peut passer dans la chaudière par le tube *t* et le tuyau *t'*. Le tube *t* est fermé à sa partie supérieure par une soupape pressée par un poids *p*, fixé à l'extrémité d'un levier $\alpha\beta$ dont le point d'appui est en *o*. Un flotteur *f* agit sur l'extrémité β de ce levier

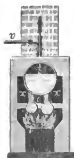


Fig. 747.

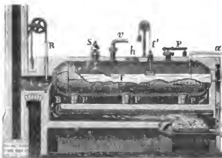


Fig. 745.



Fig. 746.

par l'intermédiaire d'un fil métallique qui traverse une boîte à étoupe *e*. Dès que le niveau baisse dans la chaudière, le flotteur descend, la soupape s'ouvre et l'eau s'introduit par le tube *t*, jusqu'à ce que le niveau ait assez remonté pour que la soupape se referme.

1011. Chaudières à haute pression. — Les chaudières dans lesquelles la vapeur doit posséder une forte pression présentent ordinairement la forme cylindrique, et sont munies de *tubes bouilleurs*. La *fig.* 745 représente une chaudière à bouilleurs vue de côté, avec une coupe longitudinale du fourneau, dont la *fig.* 746 montre la partie antérieure, et la *fig.* 747 une coupe transversale. Les mêmes lettres indiquent les mêmes objets sur les trois figures. *v*, *v*, *v* est la prise de vapeur. Le tube *a* amène l'eau de la pompe d'alimentation ; ce tube plonge au fond de la chaudière, pour éviter que l'eau en tombant à travers la vapeur n'en condense une partie. *b*, *b* (*fig.* 746) et B*b* (*fig.* 745) sont les *bouilleurs* : ils consistent en deux tubes dont le diamètre est plus petit que celui de la chaudière, et qui sont fermés à la partie antérieure par des autoclaves. Ils communiquent avec la chaudière par les tuyaux P, P, P nommés *puisards*.

La chaudière est renfermée dans un fourneau en briques dont les bouilleurs traversent la paroi antérieure, comme on le voit en *b*, *b* (*fig*. 746). de manière qu'il est facile de les nettoyer en ouvrant les autoclaves. R est un registre au moyen duquel on règle le tirage de la cheminée. On jette du combustible sur la grille du foyer par la porte *c*, qui reste ensuite fermée. La flamme échauffe d'abord les bouilleurs en dessous, puis elle passe en B (*fig*. 745), et circule dans l'espace *o* (*fig*. 747), limité latéralement par deux cloisons en briques, construites entre les puisards, et limité en dessous par une cloison horizontale placée à la hauteur des bouilleurs, et dont on voit une coupe longitudinale dans la *fig*. 745, et une coupe transversale dans la *fig*. 747. La flamme revient ensuite à la cheminée par les espaces *xx*, dans lesquels elle échauffe le corps principal de la chaudière. Le niveau de l'eau doit toujours être au-dessus de la surface de chauffe, c'est-à-dire être plus élevé que la partie supérieure des espaces *xx*. Un petit registre *e* (*fig*. 745) que l'on peut faire avancer au moyen de la tige *r*, permet de faire passer de l'air par une fente *e* qui règne dans toute la largeur du fourneau; ce que l'on fait quand on veut ralentir le feu, cet air ne traversant pas alors la grille qui porte le charbon.

Les bouilleurs ayant un diamètre moindre que le corps de la chaudière, la tôle dont ils sont formés peut être moins épaisse que celle de la chaudière, dans le rapport renversé des diamètres; mais on dépasse toujours l'épaisseur ainsi calculée, parce que, en contact direct avec le feu, les bouilleurs s'usent plus vite que la chaudière. C'est pourquoi on les dispose de manière qu'on puisse facilement les démonter et les remplacer sans être forcé de démolir le fourneau. Quant au diamètre du corps de la chaudière, ordinairement on ne lui donne pas plus de 1^m; quand on a besoin d'une grande capacité, on augmente la longueur, ou bien on emploie plusieurs chaudières. La forme cylindrique s'applique souvent aussi aux chaudières à basse pression, mais le plus souvent il n'y a pas de bouilleurs. Dans les navires à vapeur on se sert de chaudières à foyer intérieur, sur lesquelles nous reviendrons.

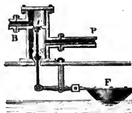


Fig. 748.

1012. Alimentation. — Les chaudières à haute pression ne peuvent être alimentées par le système à colonne d'eau (1010). On emploie dans ce cas les pompes foulantes déjà indiquées (998). Comme la chaudière ne dépense pas rigoureusement un poids de vapeur égal au poids de l'eau que la pompe fournit, celle-ci peut être séparée à volonté des leviers qui la font mouvoir. Vers 1760, Brindley a imaginé une disposition par laquelle l'alimentation est réglée sans qu'on ait à s'en occuper. Un flotteur F (*fig*. 748) repose sur l'eau de la chaudière, dont il suit le niveau. Ce flotteur fait jouer deux soupapes *r*, *s* qui s'ouvrent de dehors en dedans par rapport à une capacité qui reçoit, par le tube P, l'eau

de la pompe d'alimentation. Les deux soupapes sont liées invariablement par une tige articulée avec le levier du flotteur F. Dans la position de la figure, l'eau de la pompe s'introduit dans la chaudière; mais quand le niveau s'élève, le flotteur en montant abaisse le système des soupapes, *s* se ferme, *r* s'ouvre, et l'eau de la pompe, au lieu de passer dans la chaudière, s'échappe par le tube B.

Injecteur Giffart. — M. Giffard a imaginé, il y a quelques années, un appareil d'alimentation très original, dont aucune pièce n'est mobile, et qui est complétement indépendant de la machine; c'est une annexe de la chaudière, pouvant s'alimenter pendant le repos. La *fig.* 749 représente une coupe

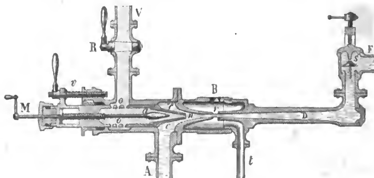


Fig. 749.

de l'appareil, qui peut être placé horizontalement ou verticalement. Le tuyau V communique avec la vapeur de la chaudière, le tuyau F avec l'eau qu'elle contient, et le tuyau A avec le réservoir de l'eau d'alimentation. La vapeur arrivant en V passe dans un tube conique *ono* par les trous *o*, *o*, et sort par l'ouverture *n*, qu'on peut rétrécir plus ou moins au moyen du bouchon conique *a* porté par une vis que l'on fait tourner au moyen de la manivelle M. Cette vapeur, sortant en *n*, s'élance dans un espace conique *cc*, et entraîne par communication latérale de mouvement, l'air logé en *cc*. Il en résulte une aspiration, et l'eau arrive par le tube A, se mêle à la vapeur qui se condense, et est chassée en *r* dans le tube conique évasé D, par lequel elle est refoulée dans la chaudière. Une soupape *s* empêche le retour de l'eau quand, le robinet R étant fermé, l'injecteur ne fonctionne pas. On voit que l'effet produit vient de ce que la force vive de la vapeur et de l'eau en mouvement en *nr*, peut vaincre la pression hydrostatique de la vapeur résistant en FD. Par exemple, si nous supposons une pression de 5 atmosphères, il résulte du calcul que la vapeur mêlée avec une masse d'eau entraînée égale à 15 fois son poids environ, entre dans le tube D avec une vitesse de 34 mètres au moins; tandis que la vitesse d'un jet d'eau

lancé par la pression de 5 atmosphères, n'est que de 28 mètres environ. Le jet entraîné par la vapeur pourra donc refouler l'eau de la chaudière et s'y introduire.

La quantité d'eau que la vapeur peut ainsi injecter est d'autant plus faible que la pression est plus basse dans la chaudière; mais le rapport de son poids à celui de la vapeur est plus grand. L'appareil peut fonctionner sous une pression de $\frac{1}{5}$ seulement au-dessus de la pression atmosphérique. Plus la pression est faible, plus il faut enfoncer l'orifice *n* dans le cône *cc* qui l'enveloppe; ce que l'on fait au moyen de la vis *v*, qui fait glisser tout le système M*n* dans une boîte à étoupes. On reconnaît que l'appareil est bien réglé, quand il ne tombe pas d'eau par le tube de trop-plein *t*. B est un regard par lequel on peut examiner la forme du jet liquide. En même temps on enfonce plus ou moins l'obturateur *a*, en agissant sur la manivelle M.

L'injecteur Giffart est déjà très employé, tant dans les machines fixes que sur les locomotives; il économise les 3 ou 4 pour cent de travail que dépense la pompe d'alimentation, dont l'entretien est si dispendieux et si assujettissant. Il peut servir de machine à élever l'eau; avec une pression de 8 atmosphères, on peut faire monter l'eau à 80 mètres, et dans les cas où l'on a besoin d'eau chaude, l'appareil est très économique. Le yacht impérial l'*Aigle* vient d'être muni d'un semblable appareil, qui, en cas d'accident, permettrait d'extraire de la cale 500 000 litres d'eau par heure, au moyen de la vapeur des chaudières.

1013. APPAREILS DE SURETÉ. — Les chaudières sont accompagnées de divers appareils de sûreté, destinés à empêcher leur rupture par une trop grande tension de la vapeur. Ces appareils sont les ***soupapes de sûreté***, les ***manomètres*** et les ***indicateurs du niveau***.

Soupape de sûreté. — Pour limiter la tension de la vapeur dans une chaudière, on ménage à sa partie supérieure une ouverture fermée par une soupape chargée, que la vapeur doit soulever dès qu'elle atteint une certaine pression. Si s est l'aire de l'ouverture en centimètres carrés, et h la pression, en centimètres de mercure, que doit atteindre la vapeur pour que la soupape se soulève, la pression de la vapeur équivaudra à un poids égal à $sh \times 13{,}6$. Le poids de la soupape et de sa charge devra, pour faire équilibre à l'effort de la vapeur, être égal à $s\,(h - \mathrm{P})\,13{,}6$; P représentant la pression atmosphérique, qui doit être retranchée de h, puisqu'elle contrebalance une partie, P, de la pression de la vapeur.

La valeur qu'il faut donner à s dépend de l'étendue S de la surface de chauffe; on la détermine au moyen de la formule

$$d = 2{,}6\sqrt{\frac{\mathrm{S}}{\mathrm{H} - 0{,}412}},$$

dans laquelle d est le diamètre de la soupape supposée circulaire, et H la

tension limite de la vapeur en atmosphères. Il résulte de l'expérience, qu'une soupape ayant les dimensions données par cette formule laisse passer, quand elle est soulevée, toute la vapeur qui se produit avec le feu le plus actif. On emploie ordinairement deux soupapes semblables, pour plus de sécurité.

La soupape de sûreté a été inventée par Papin. La manière dont on la dispose ordinairement est indiquée dans la *fig.* 750. La soupape s'applique sur l'extrémité d'une tubulure placée à la partie supérieure de la chaudière : elle porte une pointe O, sur laquelle s'appuie un levier horizontal *c*P chargé d'un poids, et guidé dans ses mouvements par une pièce *a*. La soupape est représentée à part en S ; elle se compose d'un plateau circulaire, qui s'applique exactement sur le contour de l'ouverture, en le recouvrant très peu, dans une largeur au plus de 2^{mm} pour les plus grandes soupapes. Trois ailettes, disposées au-dessous du plateau, et dont on voit la coupe en *r*, servent à guider la soupape dans la tubulure qu'elle est destinée à fermer.

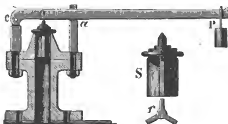


Fig. 750.

Plaques fusibles. — Pour limiter la tension de la vapeur, on peut aussi procéder en limitant sa température. C'est ce que l'on fait en fermant une tubulure adaptée à la partie supérieure de la chaudière, avec une plaque faite d'un alliage d'étain, de bismuth et de plomb, susceptible de fondre en donnant issue à la vapeur, à la température qu'elle possède lorsque sa tension atteint la limite qu'on ne veut pas dépasser. La plaque fusible est fixée par un anneau en fer, retenu sur le contour par des boulons, et portant un grillage destiné à soutenir la plaque, qui est assez fragile. Dans la *fig.* 744, une plaque fusible est disposée à l'un des côtés de la tubulure *s*, dont l'autre côté porte la soupape de sûreté. — Les plaques fusibles, autrefois imposées en France par l'administration, sont aujourd'hui généralement abandonnées ; elles présentent le grave inconvénient de laisser, quand elles se fondent, la machine sans mouvement ; ce qui peut occasionner des accidents, surtout dans les navires à vapeur qui, privés de leur moteur, peuvent être jetés à la côte par les vents ou les courants.

1014. Manomètres. — La pression de la vapeur est indiquée par des manomètres de formes diverses. Dans les chaudières à basse pression, on emploie souvent un tube en U, dont une extrémité communique avec la vapeur, et l'autre avec l'atmosphère. Ce tube contient du mercure, et la différence de niveau dans les deux branches indique l'excès de pression de la vapeur sur celle

de l'air extérieur. Le tube étant ordinairement en fer, on met sur le mercure, dans la branche extérieure, un flotteur surmonté d'une tige rigide, dont l'extrémité supérieure indique les mouvements du niveau.

Dans les chaudières à haute pression, on emploie souvent des manomètres à air comprimé (I, 326). Mais ces instruments donnent, au bout de quelque temps, des indications fausses : c'est que le mercure chaud absorbe une partie de l'oxygène de l'air qu'ils contiennent. En outre, l'oxyde formé se dépose sur le tube et empêche d'apercevoir le niveau du mercure. On pourrait obvier à ces inconvénients en mettant de l'azote au lieu d'air dans l'instrument. Il peut arriver aussi que, lors des diminutions brusques de pression, une portion du gaz sorte du tube ; alors la graduation se trouve inexacte. Enfin, les indications du manomètre à air comprimé sont influencées par la température, qui peut varier entre des limites étendues, dans le voisinage de la chaudière.



Fig. 751. Fig. 752.

Manomètres à air libre. — Ces instruments sont imposés en France par l'administration. Le plus simple (*fig.* 751) consiste en un tube plongeant dans un réservoir de mercure. Ce réservoir est renfermé dans un vase hermétiquement fermé communiquant avec la chaudière par le robinet qui se voit à sa partie inférieure. La pression de la vapeur soulève le mercure dans le tube, à une hauteur égale à autant de fois 760^{mm} que la vapeur possède d'atmosphères de pression. Comme le tube est assez long, et qu'il est peu facile d'observer le niveau du mercure, on dispose souvent un flotteur *f* attaché à un fil passant sur une poulie, et tendu par un contre-poids qui indique les mouvements de la colonne de mercure, sur une échelle dont il parcourt les divisions. Le tube peut alors être en fer, mais il faut toujours qu'il ait un diamètre assez grand pour que le flotteur ait ses mouvements libres, ce qui fait que ce manomètre exige beaucoup de mercure.

Quand la pression à mesurer doit dépasser 5 atmosphères, on emploie de préférence le manomètre à air libre de M. Chaussenot aîné (*fig.* 752). Un tube en fer replié en U contient du mercure ; ce tube est enterré dans le sol, de manière que le robinet du vase en fonte *v* soit à la hauteur de la chaudière. La vapeur de cette dernière presse sur l'eau qui remplit le vase *v* et fait monter le mercure dans un gros tube de verre fixé à l'extrémité opposée, portant une

graduation établie directement par l'expérience. Comme le tube de verre possède un plus grand diamètre que le tube de fer, les déplacements du niveau dans le premier sont assez peu étendus pour que l'observation en soit facile. Le vase r est destiné à recevoir le mercure qui pourrait être projeté, par une augmentation brusque de la pression.

Thermo-manomètre. — Au lieu de mesurer directement la pression de la vapeur, on peut observer sa température pour en déduire la pression au moyen des tables de tension. Cette température est donnée par un thermomètre pouvant marquer 200°, renfermé dans un tube en fer, qui entre dans la chaudière. L'espace que laisse autour de lui le thermomètre, est rempli de limaille de cuivre. Ce thermomètre porte une échelle sur laquelle sont inscrites les pressions de la vapeur, pour chaque température; ainsi gradué, il se nomme *thermo-manomètre*.

Manomètre métallique. — L'instrument le plus commode pour indiquer la pression est le manomètre métallique (I, 327). On l'emploie principalement sur les bateaux à vapeur et les locomotives des chemins de fer. Cet instrument est peu embarrassant et peu fragile. Il est bon d'en vérifier de temps en temps la graduation, à cause des changements que pourrait éprouver l'état moléculaire du tube courbe, sous l'influence de pressions prolongées, et de changements considérables de température.

1015. Indicateurs du niveau. — Nous verrons bientôt que l'abaissement de niveau au-dessous de la surface de chauffe est une des causes les plus fréquentes d'explosion; aussi s'est-on appliqué à perfectionner les appareils d'alimentation et ceux qui font connaître la position du niveau. Dès le principe, on a employé deux tubes à robinet, nommés *jauge à niveau*, s'ouvrant dans la chaudière très près de la surface de l'eau, l'un au-dessus et l'autre au-dessous de cette surface. Dans la position normale du niveau, le premier donne de la vapeur quand on ouvre le robinet, et le second de l'eau. On voit de ces tubes dans la *fig.* 726.

Tube à niveau. — Le plus souvent, les chaudières à vapeur sont munies d'un *tube à niveau n* (*fig.* 745 et 746). Cet instrument est composé de deux tubes métalliques, réunis en avant du fourneau par un tube vertical en cristal, et dont l'un communique avec la vapeur, et l'autre avec l'eau de la chaudière. Le niveau, dans le tube de cristal, est à la même hauteur que dans la chaudière, d'après la théorie des vases communiquants. Des robinets, habituellement ouverts, sont placés aux extrémités du tube de cristal; on les fermerait si ce tube venait à être brisé par accident.

Flotteur à indicateur. — Cet appareil à niveau, qui se voit en f' dans la *fig.* 745, consiste en un flotteur qui suit le niveau de l'eau. Ce flotteur est attaché à un contre-poids, par un fil métallique qui traverse une boîte à étoupe f', et passe sur une poulie de renvoi. La position du niveau est indiquée, soit par la position du contre-poids, soit par une aiguille fixée à l'axe de la poulie.

M. Chaussenot aîné dispose le flotteur à l'extrémité d'un levier, comme on le voit en *f*.

Flotteur à sifflet d'alarme. — Les divers appareils à niveau que nous venons de décrire doivent être constamment observés. Le défaut d'attention pourrait donc en rendre les indications inutiles. M. Sorel a imaginé une disposition, au moyen de laquelle un chauffeur négligent est averti du trop grand abaissement du niveau. Le flotteur *f* (*fig.* 745) est fixé à l'extrémité d'un levier du premier genre, dont l'extrémité opposée porte un contre-poids. Le point d'appui de ce levier se voit en O, dans la *fig.* 753. En *c* est un cône métallique qui ferme hermétiquement une ouverture conique. La vapeur s'échappe par cette ouverture quand le flotteur, qui est fixé au bras F, descend au-dessous de la limite assignée. La vapeur produit alors un son aigu très intense en traversant une sorte de sifflet que l'on voit en S. Ce sifflet se compose d'un hémisphère creux à bords tranchants, contre lesquels vient se briser la lame de vapeur qui sort par une fente circulaire *oo* qui s'étend au-dessous. On voit en S*f* (*fig.* 745) l'ensemble de l'appareil.

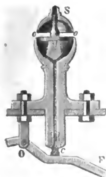


Fig. 753.

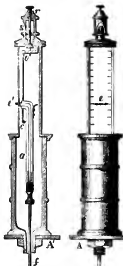


Fig. 754

Indicateur magnétique. — Un flotteur soutient, par l'intermédiaire de la tige *f* (*fig.* 754), un aimant *a*, qui peut monter et descendre dans un tube métallique fixé sur la paroi supérieure A, A' de la chaudière. Une petite aiguille horizontale en acier *e*, *e'*, appuyée sur une face plane du tube, suit les mouvements de l'aimant, et indique par sa position la hauteur du niveau. Si ce dernier s'abaisse trop, l'extrémité de l'aimant agit sur le crochet *c*, et fait ouvrir une soupape *o*, par laquelle la vapeur s'échappe en faisant jouer le sifflet *s*. Quand l'aimant remonte, la soupape *s* se ferme par l'effet d'un petit ressort logé en *r*. Cet appareil ingénieux est dû à M. Lethuillier-Pinel.

1046. Des explosions des chaudières à vapeur. — Des accidents graves, de moins en moins fréquents, mais qui viennent encore de temps à autre épouvanter l'industrie, se produisent avec les machines à vapeur. On voit les chaudières éclater, et des fragments quelquefois d'un poids énorme être lancés à de grandes distances. Il y a de ces événements qui sont occasionnés par le mauvais état des appareils de sûreté et par l'usure des chaudières, dont

les parois perdent, à la longue, de leur épaisseur, soit par l'action corrosive de certaines eaux, soit par l'action du feu. On évite cette cause d'accidents en visitant de temps en temps les générateurs dans toutes leurs parties. D'autres explosions ont été occasionnées par l'imprudence des ouvriers qui, pour accélérer la marche de la machine, avaient surchargé les soupapes, et même, chose à peine croyable, les avaient complètement fixées. La tension de la vapeur peut alors devenir trop forte, la chaudière se déchire, et la détente de la vapeur accumulée, jointe à celle qui se forme subitement au moment où l'eau surchauffée n'éprouve plus l'énorme pression qu'elle supportait, projette au loin les débris de la chaudière et de son fourneau. Pour éviter cette cause d'accident, on recouvre souvent les soupapes d'un grillage qui empêche de les surcharger.

Il est d'autres explosions dont les causes sont restées longtemps obscures; elles sont souvent accompagnées de circonstances qu'il faut d'abord signaler; ainsi, on a observé plusieurs fois que la catastrophe avait été précédée d'un ralentissement dans la marche de la machine. Souvent aussi on a remarqué, principalement sur les bateaux à vapeur, que l'accident avait lieu au moment où une machine arrêtée était mise en marche; c'est-à-dire quand la vapeur accumulée dans le générateur perdait subitement une partie de sa tension, par son passage dans le corps de pompe. L'explosion est souvent aussi précédée de l'ouverture des soupapes de sûreté. Nous allons faire connaître les trois principales causes qui servent à expliquer ces explosions.

Abaissement du niveau. — L'abaissement du niveau au-dessous de la limite supérieure de la surface de chauffe présente de grands dangers. La partie de cette surface qui n'est pas mouillée peut rougir, ce qui diminue énormément la ténacité du fer, et le constitue le long de la ligne de niveau, dans un état moléculaire qui change brusquement, des parties rouges aux parties mouillées qui sont au-dessous; d'où résulte un arrangement irrégulier des molécules, qui les rend plus faciles à séparer. Cette circonstance explique pourquoi on a souvent remarqué que la rupture se fait suivant la ligne horizontale du niveau, malgré les inégalités d'épaisseur sur cette ligne. Pour provoquer l'explosion, il suffit d'une diminution de pression, produite, par exemple, par l'ouverture de la soupape de sûreté; il se fait aussitôt une ébullition tumultueuse, l'eau mousse, elle est lancée contre les parois brûlantes et au milieu de la masse de vapeur surchauffée par leur contact; il se forme alors une énorme quantité de vapeur, à laquelle la chaudière ne peut résister, surtout dans les parties incandescentes où le fer ne possède plus que $\frac{1}{6}$ de sa résistance à froid. Cette explication est due à Perkins. On voit qu'il ne faut pas donner aux soupapes de sûreté une trop grande ouverture; au moment où elles se soulèveraient, la diminution de pression serait trop brusque, et la projection de l'eau à travers

[1] Dans les mines où l'on n'a à sa disposition que des eaux corrosives, on neutralise leur action en y mêlant de la craie exempte de sable, ou bien des morceaux de zinc, sur lesquels l'eau exerce de préférence son action.

la vapeur accumulée et sur les parois sèches, très abondante. De plus, ce changement brusque de tension imprimerait à la chaudière une secousse qui pourrait en compromettre la solidité [1].

Dépôts dans les chaudières. — L'incandescence si dangereuse des parois peut être provoquée par une autre cause que l'abaissement du niveau : l'eau de la chaudière dépose, à mesure qu'elle se réduit en vapeur, les matières terreuses ou salines qu'elle tient en dissolution. Ces dépôts acquièrent souvent une dureté extrême et adhèrent aux parois avec une telle force qu'on ne peut les enlever qu'à l'aide d'un ciseau. C'est principalement dans les chaudières à basse pression, où la vaporisation est plus lente, qu'ils acquièrent cette grande dureté ; ils ralentissent la production de la vapeur en empêchant le passage de la chaleur. Ainsi séparées de l'eau par un corps mauvais conducteur, les parois peuvent rougir et perdre une grande partie de leur ténacité, ce qui est déjà un danger. Si ensuite quelque fissure se forme dans la croûte calcinée au contact des parois rouges, l'eau pénètre jusqu'au métal brûlant, il se produit une vaporisation brusque qui fait détacher de grandes plaques de la croûte déposée ; et l'eau venant au contact de la surface découverte, il se produit instantanément une énorme quantité de vapeur. On évite cette cause d'explosion, en nettoyant souvent les chaudières ; tous les huit ou quinze jours on les vide et on enlève la couche déposée.

On peut empêcher les dépôts de se former, par un moyen que le hasard a fait connaître : des ouvriers avaient déposé dans une chaudière qu'on venait de vider, des pommes de terre pour les faire cuire, puis ils les avaient oubliées. Lorsque plus tard, la chaudière ayant fonctionné pendant un certain temps, on voulut de nouveau la nettoyer, on reconnut avec surprise qu'il ne s'était pas formé de dépôt adhérent. Les pommes de terre avaient été réduites à l'état de bouillie, et la fécule mêlée aux matières déposées les avait empêchées de prendre de la consistance. Depuis, on a employé l'argile, qui se délaye dans l'eau et empêche les dépôts d'adhérer. On arrive au même résultat en colorant l'eau au moyen de bois de teinture. M. Delandre a recommandé récemment l'emploi du protochlorure d'étain. Il suffit de 1^k de cette substance par mètre cube d'eau évaporée. Ce sel se change en sous-sel basique insoluble et en sel acide soluble qui dissout les sels terreux. Les résultats obtenus par ces différents moyens dépendent beaucoup de la nature des eaux employées. Quand on veut nettoyer la chaudière, on ouvre un robinet placé tout au bas, pendant que la vapeur exerce encore sa pression, et l'espèce de boue ou de vase déposée, sort avec force par le robinet.

Explosions des chaudières à bouilleurs. — Quand les tubes qui font communiquer les bouilleurs avec le corps d'une chaudière sont trop étroits, il

[1] Si par une cause quelconque le niveau s'abaissait au-dessous de la surface de chauffe, il faudrait fermer le registre de la cheminée et ouvrir les portes du fourneau, pour ralentir la combustion, et se bien garder de soulever les soupapes de sûreté.

peut arriver que la vapeur entraîne l'eau hors des bouilleurs, et que ce liquide ne puisse redescendre par les mêmes passages. Alors les bouilleurs, en partie vides, peuvent rougir; l'eau qu'ils contiennent cesse d'être en contact avec les parois, et la production de la vapeur devient très lente (956). Il arrive nécessairement un moment où la température des parois s'abaissant, l'eau les mouille, et il se produit tout à coup une telle quantité de vapeur, que la chaudière éclate. Il n'est pas nécessaire même que l'eau soit éloignée mécaniquement des parois, pour qu'elle cesse de les mouiller; M. Gordon a vu des robinets adaptés, au-dessous du niveau de l'eau, à un tube de fer fortement chauffé, ne laisser échapper que de la vapeur. M. Normamby a constaté qu'une chaudière peut être chauffée au rouge en activant suffisamment le feu. Il faut donc que le feu soit conduit avec attention et régularité pour éviter qu'il en soit ainsi.

Enfin, il se produit quelquefois des explosions d'une violence extrême, que l'on désigne sous le nom d'explosions fulminantes, et dont la cause est restée longtemps obscure. M. Donny et M. Galy-Cazalat en donnent l'explication suivante : Nous avons vu (960) que l'eau privée d'air cesse de bouillir, quoique fortement échauffée, et que, arrivée à une certaine température encore plus élevée, elle se réduit brusquement en vapeur avec une véritable explosion. Or, une ébullition prolongée doit priver d'air l'eau d'un générateur dont la pompe d'alimentation a cessé de fonctionner, comme cela a lieu pendant que la machine est arrêtée. Alors la vapeur cesse de se former, la machine marche lentement, ce qui porte à activer le feu, et bientôt une explosion violente met la chaudière en pièces. Quand une machine doit s'arrêter pendant quelque temps, il est donc prudent de faire fonctionner la pompe d'alimentation, soit à bras, soit au moyen d'une petite machine à vapeur spéciale, nommée *petit cheval*, comme il en existe quelquefois d'annexées à la machine principale; alors l'air mêlé à l'eau que l'on introduit suffit pour empêcher l'explosion. L'injecteur Giffart est ici précieux, car il peut fonctionner pendant le repos de la machine[1].

1017. Résultats pratiques. — La quantité de chaleur produite par la combustion de la houille est loin d'être entièrement utilisée dans les chaudières à vapeur. Les gaz qui sortent par la cheminée, devant conserver une température de 200° a 400°, pour le tirage, emportent une partie de cette chaleur ; il y a des pertes par rayonnement et par communication aux massifs des fourneaux. D'un autre côté, la combustion n'est pas complète. Dans les chaudières à bouilleurs, la combustion de 1^{kil} de houille ne vaporise guère que 5 à 7^{kil} d'eau avec les fourneaux les mieux construits. Dans les chaudières cylindriques sans bouilleurs, on peut vaporiser de 8 à 9^{kil}, quand on a soin de jeter le

[1] On a cherché aussi à expliquer les ruptures des chaudières à vapeur par la détonation d'un mélange d'oxygène et d'hydrogène qui se formerait dans l'intérieur, le dernier de ces gaz provenant de la décomposition de l'eau. On a aussi invoqué la production de l'électricité par la vapeur. Mais ces deux explications nous semblent dénuées de fondement, et même en opposition avec plusieurs des lois physiques les mieux établies. C'est pourquoi nous n'en avons pas parlé.

combustible sur la grille par petites portions et d'une manière à peu près continue. Or, l'expérience montre que la combustion de 1kil de houille dégage environ 7500 calories, qui seraient capables de réduire en vapeur un poids d'eau à 100° égal à $\frac{7500}{537} = 13^k,9$, puisqu'il faut 537 calories pour vaporiser 1kil d'eau. Il y a donc beaucoup de chaleur perdue.

En outre, une partie de la vapeur se condense, soit sur la voûte de la chaudière, soit dans les conduits qui mènent au corps de pompe, soit enfin dans le corps de pompe lui-même. Pour atténuer autant que possible ces pertes, on recouvre la partie supérieure de la chaudière avec des briques, et l'on enveloppe les conduits d'une couche épaisse d'étoffes de laine, ou bien on les entoure d'un manchon dans lequel on fait passer des gaz chauds provenant du fourneau. Le corps de pompe est préservé du refroidissement au moyen d'une garniture en bois séparée de sa surface, par du charbon en poudre ou par toute autre matière peu conductrice; ou bien encore au moyen d'une enveloppe métallique sous laquelle on fait circuler la vapeur. Il est vrai que cette vapeur se condense dans l'enveloppe comme elle le ferait dans le corps de pompe; mais il est facile de voir qu'il y a néanmoins une grande économie de force et par conséquent de vapeur. En effet, l'eau condensée dans le cylindre se réduit en vapeur quand la communication s'établit avec le condenseur, et la pression de cette vapeur s'oppose au mouvement du piston. Il est donc important que le corps de pompe reste constamment sec. M. Combes a reconnu que l'enveloppe peut faire économiser de 15 à 20 pour cent du combustible.

Une autre cause de perte de chaleur provient de l'eau en fines gouttelettes mêlée à la vapeur et entraînée dans le corps de pompe, où elle gêne les mouvements du piston. Pour éviter cet inconvénient, on adapte souvent à la partie supérieure de la chaudière un dôme plus ou moins élevé, au sommet duquel se trouve la prise de vapeur. Ce dôme augmente la capacité de la *chambre à vapeur* c'est-à-dire de l'espace occupé par la vapeur au-dessus de l'eau. La quantité de liquide entraînée mécaniquement peut être considérable; on a vu des chaudières perdre ainsi une telle quantité d'eau, que la pompe d'alimentation ne pouvait suffire à la remplacer; et lorsqu'on eut surmonté la chaudière d'un dôme, la perte fut tellement diminuée qu'il y eut une économie de combustible de près de 25 pour cent.

La quantité de combustible employée par cheval et par heure varie beaucoup suivant l'espèce de générateur, et aussi suivant le système de machine adopté. Ordinairement, on dépense par cheval et par heure de 3 à 5kil de houille, qui vaporisent à peu près 35 litres d'eau. La surface de chauffe doit être de 1,70 mètres carrés, et la surface de la grille de 70 centimètres carrés, par cheval.

La quantité de combustible qui correspond au travail utile par force de cheval et par heure, varie aussi énormément, avec le système adopté. Par exemple, tandis que les machines à haute pression *avec détente et condensation* donnent 90,000 à 108,000 kilogrammètres par heure et par cheval, avec 4 à 2,5kil

de houille, ces machines ne donnent que 21,500 à 27000 kilogrammètres avec 10 à 8kil de combustible, quand elles marchent *sans détente ni condensation*. Depuis quatre à cinq ans on est parvenu à économiser considérablement le combustible; ainsi, M. Farcot a dernièrement construit des machines perfectionnées, qui ne dépensent pas 1k,5 de charbon par heure et par cheval.

De même qu'on a cherché à diminuer le poids du mécanisme des machines à vapeur, de même on s'applique aujourd'hui à réduire les dimensions des générateurs, tout en leur conservant la faculté de produire rapidement la vapeur, soit en augmentant relativement l'étendue de la surface de chauffe, soit en activant la combustion dans un foyer de dimensions restreintes. Les chaudières tubulaires, dont nous parlerons bientôt, ont déjà fait beaucoup avancer la question. Il faudrait pouvoir, avec une petite quantité d'eau et au moyen d'une vaporisation rapide, fournir au fur et à mesure, la quantité de vapeur dont la machine a besoin. C'est ce que l'on fait au moyen de chaudières très petites dont le fond est rendu incandescent. Un filet d'eau tombe sur ce fond, prend la forme globulaire et fournit la vapeur. Des machines donnant d'excellents résultats ont été construites dans ce système par M. Testud de Beauregard. Une de ces machines est de la force de 20 chevaux. Pour éviter la destruction rapide de la chaudière par le refroidissement brusque produit par l'arrivée de l'eau, le fond plonge dans de l'étain fondu auquel est alors empruntée la chaleur enlevée par l'eau. D'après l'inventeur, l'économie de combustible serait de 50 pour cent.

Nous aurons à revenir sur les effets mécaniques produits par une quantité donnée de chaleur quand nous traiterons des sources de chaleur.

III. Navires à vapeur et locomotives.

1018. NAVIRES A VAPEUR. — Papin, qui le premier a fait mouvoir un piston au moyen de la vapeur, est aussi l'inventeur des navires à vapeur. Indépendamment des indications qu'il donne dans son ouvrage de 1795, on voit dans une correspondance citée plus haut, entre lui et Leibnitz, qu'il a fait construire un bateau d'assez grandes dimensions, essayé avec succès sur la Fulda. En 1707, ayant désiré transporter son appareil en Angleterre pour y répéter ses expériences et montrer comment on peut, au moyen du feu, « rendre un ou deux hommes capables de produire plus d'effet que plusieurs centaines de rameurs, » il demanda à l'électeur de Hanovre, par l'entremise de Leibnitz, l'autorisation de faire passer son navire de la Fulda dans le Weser; mais les mariniers s'y opposèrent, mirent sa machine en pièces, et anéantirent ainsi les dernières espérances de l'inventeur, dont les ressources étaient épuisées.

En 1753, l'Académie des sciences de Paris ayant mis au concours la question de la propulsion des navires sans l'emploi du vent, Claude Jouffroy, d'Albans,

songea à employer la machine de Newcomen, comme Jonathan Hull l'avait déjà essayé, pour faire tourner une roue à aubes disposée à l'arrière d'un bateau. En 1770, après les perfectionnements apportés par Watt à la machine atmosphérique, et après quelques tentatives faites par Perrier sur la Seine, Jouffroy fit marcher sur le Doubs, à Baume-les-Dames, une barque de 40 pieds de long portant des rames palmipèdes mues par la vapeur. Il adopta plus tard les roues à aubes, dans des expériences qu'il fit sur la Saône, en 1783. Il remonta cette rivière avec un succès complet entre Lyon et l'île Barbe, en présence d'une foule immense. Il demanda alors un privilége au ministre Calonne. Celui-ci crut devoir consulter l'Académie des sciences, qui exigea de nouvelles expériences sur la Seine. Mais Jouffroy était à bout de ressources, il ne put satisfaire à cette condition, et la révolution étant survenue, il émigra et abandonna son entreprise.

Fulton, en 1807, eut la gloire de résoudre définitivement le problème de la navigation par la vapeur. Il construisit en Amérique, un bateau qui fit un service régulier entre New-York et Albany. Ce n'est qu'en 1812 que le premier bateau à vapeur parut en Europe; il se nommait *la Comète*, et naviguait sur la Clyde, en Ecosse. On sait quels progrès immenses a fait depuis la navigation à la vapeur.

1019. Machines à vapeur des navires. — Ces machines sont le plus ordinairement à condensation, à cause de la facilité d'avoir de l'eau pour alimenter le condenseur. La marine de l'État, en France et en Angleterre, a adopté généralement la basse pression. La *fig.* 755 représente la machine d'une frégate à vapeur de la force de 500 chevaux. Deux appareils semblables sont placés l'un à côté de l'autre et agissent sur le même arbre OO, au moyen de manivelles perpendiculaires l'une à l'autre; de manière que l'une est dans la position la plus favorable quand l'autre arrive à un point mort. Dans les navires de petites dimensions, on se contente ordinairement d'un appareil unique.

La machine de la *fig.* 755 n'est autre chose qu'une machine de Watt, modifiée de manière que le balancier se trouve au-dessous de l'arbre OO. Q est le corps de pompe, dans lequel la vapeur arrive par le tuyau *v*. Cette vapeur circule d'abord dans une chemise qui entoure le corps de pompe, et passe ensuite dans la boîte de distribution, dont on voit à sa droite la partie supérieure, et dans laquelle se meut le tiroir *t*. La tige du piston porte une traverse T à laquelle s'articulent deux bielles *b*, *b'*, dont les extrémités inférieures s'articulent avec deux balanciers placés de part et d'autre de l'appareil. L'un de ces balanciers se voit en εAε. Le mouvement de la tige du piston est rendu rectiligne par un double parallélogramme articulé $\alpha\beta\delta\varepsilon$, $\alpha'\beta'$...; les barres $o\gamma$, $o'\gamma'$, qui tournent autour de l'axe oo', le forcent à prendre la forme convenable.

Les deux balanciers agissent sur une même bielle BB qui fait tourner la manivelle M adaptée à l'arbre OO, aux extrémités duquel sont fixées les roues

à aubes. L'excentrique E règle la distribution de la vapeur ; elle fait osciller, par l'intermédiaire de la barre KK, le levier *sr* qui agit sur les bielles pendantes *nn* articulées à la traverse *t* du tiroir.

P est la pompe à air, mise en mouvement par le balancier, au moyen d'une traverse T' que porte la tige de son piston, et de deux bielles pendantes, dont une se voit dans la figure. La traverse T' est guidée en x ; elle fait aussi

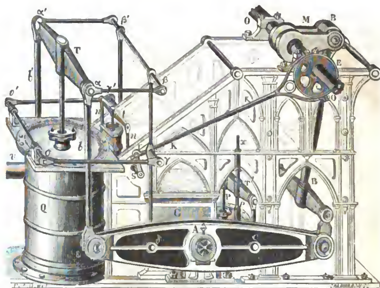


Fig. 755.

fonctionner la pompe *p* qui alimente la chaudière. C est le condenseur, alimenté par un tuyau qui s'ouvre sous l'eau en dehors du navire.

Le modèle de machine qui précède est le plus généralement adopté. Toutes les parties sont soutenues par un bâtis en fonte, et se trouvent ainsi parfaitement liées entre elles. Dans les navires de moindres dimensions, on emploie assez souvent le système à cylindre oscillant. On emploie encore la machine Maudslay, modifiée de manière à ne présenter que peu de hauteur.

1020. Du propulseur des navires à vapeur. — Dès le principe, on a employé, comme appareil de propulsion, des roues à aubes disposées de chaque côté du navire. Les aubes, en frappant l'eau, prennent leur point d'appui dans sa masse qui résiste par son inertie. Cette application est fort ancienne, car Vitruve, qui en a parlé, ignorait le nom de l'inventeur. Les aubes entrent dans l'eau et en sortent obliquement, puisqu'elles décrivent un arc de cercle. Une

composante de l'effort exercé agit donc verticalement et ne peut concourir à faire avancer le bateau. Pour éviter cet inconvénient, divers constructeurs ont imaginé d'employer des aubes mobiles, dont le plan reste vertical pendant tout le temps de l'immersion. Par exemple, M. Cavé adapte une manivelle à l'axe horizontal de chaque aube; cette manivelle est articulée à une barre qui reçoit un mouvement de va et vient d'un excentrique fixe qui entoure l'arbre des roues. Malgré ce perfectionnement, les roues à aubes ne donnent environ que $\frac{3}{5}$ d'effet utile.

Les roues à aubes présentent en mer de grands inconvénients : quand les flots sont agités, elles se trouvent tantôt submergées presque totalement, tantôt entièrement hors de l'eau. Il résulte de là, indépendamment du ralentissement de la marche, que la machine éprouve des résistances qui varient brusquement, ce qui en ébranle toutes les parties.

Quand il s'agit des navires de guerre, les roues à aubes présentent des inconvénients encore plus graves : placées dans la partie la plus vulnérable du navire, elles sont exposées à être brisées par les boulets, et elles occupent une place énorme, dans laquelle on ne peut installer de canons. L'adoption définitive de la vapeur dans la marine militaire, était donc subordonnée à la découverte d'un propulseur ne présentant pas les mêmes inconvénients. L'hélice remplit toutes les conditions désirables.

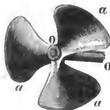


Fig. 756.

Propulseur à hélice. — Pour nous rendre compte du mode d'action de l'*hélice*, considérons d'abord une vis à filet très saillant, fixée horizontalement sous l'eau à l'arrière du navire. Si nous imprimons à cette vis un mouvement rapide de rotation sur elle-même, l'eau, en vertu de son inertie, se comportera comme un écrou, et en supposant qu'elle ne cède aucunement, la vis avancera à chaque tour, d'une quantité égale à son pas, en entraînant le navire dans son mouvement. Comme l'eau cède, tout le travail de l'hélice n'est pas utilisé pour la marche, une partie étant employée à repousser l'eau en arrière. Le travail utile augmente avec la vitesse de rotation. Ce résultat, dont on peut se rendre compte en théorie, a été constaté par les expériences de M. Normand, constructeur du *Napoléon*, second navire à hélice que l'on ait vu en France. On se contente ordinairement d'une seule spire de l'hélice, et, pour donner moins de longueur à son arbre, on la partage en plusieurs parties que l'on distribue tout autour de l'arbre, près d'une même section. La *fig.* 756 représente en perspective une hélice dont la spire est divisée en trois parties *a*, *a*, *a* disposées autour de l'arbre OO.

L'hélice est installée dans cette partie étroite du navire, qui forme à l'arrière une sorte de mur vertical, *aa*, en avant du gouvernail *g* (*fig.* 757). La figure représente la coupe longitudinale d'une frégate à hélice, par un plan vertical passant par la quille. Une large fenêtre *aa*, garnie d'un cadre en fer, supporte

l'arbre de l'hélice *i*. Cet arbre traverse la partie postérieure du navire, par une ouverture garnie d'un presse-étoupe. Un autre arbre *n*, placé sur le prolongement du premier, peut en être rendu dépendant ou indépendant, au moyen du levier *r* qui fait mouvoir un manchon à coulisse garni de chevilles. L'arbre *n* est mis en mouvement par la machine à vapeur *m*. Cette machine est composée de quatre corps de pompe horizontaux, disposés deux à deux de part et d'autre de l'arbre *n*. Les pistons agissent, par l'intermédiaire de bielles, sur des manivelles que porte l'arbre. Quelquefois, comme dans le navire l'*Archimède*, l'arbre *n* porte un tambour garni de dents, qui commande un long pignon affermi sur l'arbre de l'hélice. La grande longueur donnée au pignon est destinée à éviter la rupture des dents. Cette disposition permet de donner à l'hélice

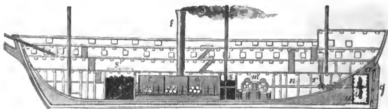


Fig. 757.

une plus grande vitesse. *c*, *c* sont les chaudières; *f* la cheminée; et *s*, *s'* les approvisionnements de charbon. On voit que tout l'appareil est à fond de cale et par conséquent à l'abri des accidents de guerre.

L'emploi de l'hélice comme propulseur des navires a précédé la découverte de la machine à vapeur. Du Quet, en 1687, a fait le premier quelques essais infructueux avec cet appareil. Plus tard, en 1777, David Bushnell réussit, en Amérique, à faire marcher un bateau plongeur au moyen d'une hélice. En 1823, le capitaine français Delisle proposa d'appliquer l'hélice aux navires à vapeur de la marine de guerre. Sauvage perfectionna beaucoup cette espèce de propulseur; il reconnut que l'effet utile est au maximum quand on ne conserve qu'une seule spire. Le premier navire à hélice expérimenté en France est l'*Archimède*, construit par M. Smith.

L'hélice étant placée au-dessous du niveau de l'eau, le mouvement des flots ne gêne pas son action, et elle est à l'abri des boulets de l'ennemi. Le seul reproche qu'on puisse lui faire, c'est que, tournant très rapidement, les coussinets qui portent son arbre s'usent assez rapidement.

1021. Chaudières des navires à vapeur. — Dans les générateurs des navires, on cherche principalement à diminuer le poids de l'appareil, tout en conservant une surface de chauffe assez étendue pour fournir une grande quantité de vapeur. On leur donne ordinairement une forme rectangulaire, et les parois planes opposées sont retenues par des tirants, allant de l'une à

l'autre, pour les empêcher de s'écarter. Ces chaudières renferment un ou plusieurs foyers intérieurs, suivis de carneaux, c'est-à-dire de gros tuyaux qui aboutissent à la cheminée après avoir fait plusieurs tours à travers l'eau. La bouche du foyer, qui est lui-même entouré d'eau, est fixée par son contour au bord d'une ouverture pratiquée dans une des parois verticales de la chaudière. On évite ainsi d'employer des fourneaux en briques qui surchargeraient le navire. On dispose souvent au milieu de l'eau de la chaudière, des cloisons destinées à la retenir quand le navire s'incline.

Chaudières tubulaires. — Pour obtenir une grande surface de chauffe, on emploie les chaudières tubulaires, inventées en 1803 par Charles Dallery. Deux réservoirs placés l'un au-dessus de l'autre communiquent entre eux par

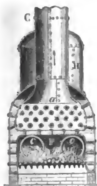


Fig. 758.

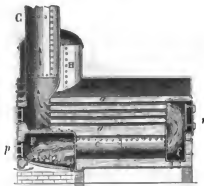


Fig. 759.

un grand nombre de tubes verticaux, remplis d'eau ainsi que le réservoir inférieur. La flamme du foyer circule autour de ces tubes, dans lesquels il se forme une grande quantité de vapeur qui se rend dans le réservoir supérieur.

Aujourd'hui on emploie fréquemment des chaudières imitées de celles des locomotives, dont le principe a été imaginé par M. Séguin, et dans lesquelles la flamme et la fumée passent dans les tubes, qui sont entourés d'eau. La *fig.* 758 représente une coupe transversale, et la *fig.* 759 une coupe longitudinale d'une de ces chaudières. Les mêmes lettres désignent les mêmes choses dans les deux figures. F est le foyer, dans lequel on jette le charbon par la porte *p*. La flamme traverse d'abord deux gros tuyaux *c*, *c* entourés d'eau de tous côtés, arrive dans l'espace *f*, et s'engage dans des tubes nombreux *aa* qui traversent la chaudière, d'où elle se rend dans la cheminée C. On voit que la surface de chauffe est d'autant plus grande que les tubes *aa* sont en plus grand nombre. La prise de vapeur se fait au haut de la chambre à vapeur H. En *r* est une porte que l'on ouvre quand on veut nettoyer les tubes *aa*; une autre porte, destinée au même usage, se voit du côté opposé.

En mer, l'eau salée, avec laquelle on alimente les chaudières, tendant à se saturer et à déposer du sel, on retire de l'eau de temps en temps par des robinets placés à la partie la plus basse de la chaudière ; c'est ce qui s'appelle *faire l'extraction*. On emploie aussi des pompes qui fonctionnent d'une manière continue ; telles sont les pompes à saumure de Maudslay. Enfin, on a imaginé de charger les chaudières avec de l'eau douce, et de les alimenter avec l'eau distillée provenant de la condensation de la vapeur. Il faut alors que cette eau ne se mêle pas, dans le condenseur, avec l'eau de mer destinée à produire le refroidissement. C'est ce que l'on obtient en faisant arriver la vapeur dans un système de tubes, disposés comme ceux des machines à vapeurs combinées (1007), et autour desquels on fait circuler de l'eau froide.

Les perfectionnements notables apportés aux chaudières dans ces dernières années, et la grande économie de combustible qui en est résultée, ont permis de franchir l'Atlantique avec des navires à vapeur emportant tout le charbon nécessaire à la traversée. C'est en 1838 qu'on a conçu l'idée hardie d'un semblable voyage. Après des hésitations prolongées et des discussions animées, on construisit un navire de fort tonnage, le *Great-Western*, muni de deux machines de la force de 240 chevaux. A l'annonce de ces préparatifs, le *Sirius*, petit navire de 700 tonneaux, portant une machine de 320 chevaux, voulut tenter l'entreprise, et partit le 5 avril de Cork, en Irlande, emportant 450 tonnes de charbon. Le *Great-Western* partit de Bristol trois jours après ; les chefs de l'entreprise n'avaient pu trouver que sept passagers, ce qui rappelle que Fulton n'en avait trouvé qu'un seul, lors de son premier voyage. Le *Sirius* fut atteint trois jours après par le *Great-Western*, mais quand il eut brûlé une grande partie de son combustible, il reprit le devant, et arriva le 23 avril en vue de New-York. La nouvelle de l'entreprise était parvenue dans cette ville depuis quelque temps, et la foule se portait chaque jour au bord de la mer, interrogeant l'horizon avec anxiété. L'enthousiasme fut général quand on aperçut au loin le panache de fumée qui annonçait l'arrivée du premier navire à vapeur qui eût franchi l'Océan. Bientôt le *Sirius* jeta l'ancre, les forts tirèrent 26 coups de canon, les navires de la rade se pavoisèrent, et les cloches de la ville furent mises en branle. Quelques heures après, le *Great-Western* abordait à son tour, ranimant un enthousiasme qui était pourtant loin d'être épuisé. Depuis, la navigation transatlantique à vapeur s'est régularisée, et quelquefois la traversée se fait en 10 jours.

1022. LOCOMOTIVES. — Nous avons vu que l'invention de la machine à vapeur a été provoquée principalement par le désir de simplifier et de faciliter l'exploitation des mines. Les chemins de fer, ainsi que les machines locomotives, avec lesquelles on peut les parcourir avec de grandes vitesses, ont la même origine. Pendant longtemps, les locomotives n'ont donné que des résultats insignifiants, à cause de la difficulté d'obtenir une grande quantité de vapeur avec un appareil de dimensions nécessairement restreintes. Ce n'est que depuis qu'on est parvenu à obtenir une grande surface de chauffe dans un

petit espace, que ces merveilleux appareils ont donné les résultats que nous admirons aujourd'hui.

Dès l'année 1759, le Dr Robison, ami de Watt, conçut le premier l'idée de faire mouvoir des voitures par la force de la vapeur ; mais on ne connaissait pas alors les machines sans condensation, et avec la masse d'eau qu'il eût dû emporter, l'appareil n'aurait pu se transporter lui-même. En 1778, un ingénieur français, Cugnot, fit à l'arsenal de Paris le premier essai d'une voiture à vapeur. Cette machine, destinée aux routes ordinaires, fonctionnait sans condensation ; elle marchait avec une vitesse d'une lieue à l'heure, mais la quantité de vapeur fournie par la chaudière étant trop petite, la machine s'arrêtait bientôt. Les essais faits depuis sont tous relatifs à la locomotion sur les chemins de fer, système de voie qui existait en Angleterre depuis deux siécles auprés des mines, pour le transport du minerai. On employa d'abord exclusivement des chevaux pour traîner les chariots chargés, dont plusieurs étaient attachés les uns à la suite des autres ; plus tard, on se servit de machines à vapeur fixes qui les tiraient au moyen d'un câble s'enroulant sur un tambour, comme cela se pratique encore aujourd'hui sur certains chemins de fer, dans les endroits où la pente est trés prononcée.

MM. Trevithick et Vivian, en 1802, construisirent la première locomotive à vapeur remorquant des wagons chargés. Elle consistait en une chaudière cylindrique à foyer intérieur et à carneaux, au milieu de laquelle se trouvait un corps de pompe à double effet. La tige du piston agissait sur deux manivelles placées aux extrémités de l'essieu de deux roues, par l'intermédiaire de bielles disposées comme dans la machine Maudslay (1000). Un volant était adapté à l'arbre des roues, pour régulariser le mouvement qui leur était imprimé par la vapeur. Si nous supposons que les roues en tournant, ne puissent glisser sur les rails, nous verrons qu'à chaque tour, la voiture devra s'avancer d'une quantité égale à la longueur de leur circonférence. Une semblable machine fut employée dans le pays de Galles, sur un chemin de fer de 3 lieues de longueur dépendant d'une mine de charbon. Elle remorquait 100 tonnes de houille avec une vitesse de 2 lieues à l'heure. Mais l'insuffisance de la surface de chauffe forçait à emmagasiner de la vapeur avant de partir, et à la ménager pendant le trajet, si l'on ne voulait pas être forcé de s'arrêter en route.

On croyait alors que le frottement sur des rails unis ne suffisait pas pour empêcher le glissement des roues. Pour lever cette difficulté, qui pouvait n'être pas chimérique avec les machines de faible poids que l'on construisait alors, on cannela les rails, ce qui fit qu'ils s'usérent promptement. En 1811, Blenkensop plaça dans toute la longueur de la voie une crémaillère dont les dents s'engageaient dans celles d'une roue mise en mouvement par la machine. En 1812, Chapmann remplaça la crémaillère par une chaîne sans fin tendue parallèlement aux rails. Brunton, en 1813, fit avancer une locomotive au moyen de barres articulées, fonctionnant comme les jambes de derriére d'un cheval. Ce n'est qu'en 1814 que Blackett, ingénieur anglais, pensa que l'adhérence sur des

rails unis pourrait bien être suffisante pour faire avancer une locomotive, et l'expérience lui prouva qu'il en était ainsi; il fallait seulement charger les roues d'un poids d'autant plus fort que la machine devait remorquer un plus lourd convoi.

L'emploi des locomotives fut considérablement simplifié par cette découverte, et dès lors on travailla activement à en perfectionner toutes les parties. MM. Dodd et Stephenson supprimèrent le volant, en associant deux corps de pompe qui agissaient sur des manivelles perpendiculaires l'une à l'autre. M. Hackworth supprima tout engrenage. Plus tard, Stephenson inclina les cylindres à 45°, et l'on en vint peu à peu à les placer horizontalement, ce qu'on n'avait encore osé faire sur aucune machine, pensant que les pistons s'useraient trop vite.

Malgré tous ces perfectionnements, les locomotives ne pouvaient fournir qu'une course peu étendue, à cause de l'exiguité de la surface de chauffe, à laquelle on n'avait pu faire dépasser 8 mètres carrés, en développant le plus possible les circonvolutions des carneaux. Enfin, en 1827, la solution si longtemps cherchée fut trouvée par M. Séguin, à la suite d'expériences faites dans les chantiers du chemin de fer de Saint-Etienne à Lyon. Il imagina de disposer à travers l'eau de la chaudière, des tubes traversés par la flamme du foyer, de manière à obtenir ainsi une surface de chauffe considérable. En 1829, cette invention fut appliquée par M. Stephenson, qui, le premier, construisit une locomotive capable de fournir d'une manière continue la quantité de vapeur nécessaire à sa marche. Cette découverte coïncida avec la construction du premier chemin de fer mis à la disposition des voyageurs. Pour mettre un frein à l'avidité des propriétaires du canal de Liverpool à Manchester, on établit entre ces deux villes un chemin de fer, destiné d'abord au transport des marchandises seulement, sur lequel les wagons devaient être remorqués par des machines à vapeur fixes. Quand il fut terminé, les ingénieurs songèrent à employer des locomotives, et ils appelèrent tous les constructeurs à un concours où devait être couronnée la machine la plus parfaite. La locomotive de Stephenson remporta le prix; elle avait quatre roues, présentait 12 mètres carrés de surface de chauffe, et remorquait 13 tonnes sur un plan horizontal, avec une vitesse de 6 lieues à l'heure; isolément, elle faisait 10 lieues. Cette machine présentait aussi une disposition particulière, que nous allons faire connaître, destinée à activer le tirage de la cheminée pendant sa marche.

1023. Description de la locomotive à six roues. — On a, depuis, singulièrement perfectionné les locomotives, tout en leur conservant les dispositions générales adoptées par Stephenson. La *fig.* 760 représente la coupe longitudinale d'une locomotive à six roues. On y distingue deux parties principales : la chaudière avec son foyer, et le mécanisme que la vapeur fait mouvoir. Le corps de la chaudière présente une forme cylindrique ; à l'une de ses extrémités se trouve une cavité rectangulaire F entourée d'eau de tous côtés, excepté en bas : on la nomme *boîte à feu*. Toutes les parties planes sont reliées

par des tirants qui s'opposent à la flexion des parois. La porte *o* sert à jeter le combustible sur la grille, à laquelle l'air arrive par une large ouverture *n* que le mécanicien qui conduit la machine peut fermer plus ou moins, au moyen d'une tige qui arrive jusqu'à une galerie, placée près de la boîte à feu, sur laquelle il se tient. Des tubes *c*, *c*, *c*, qui vont de la boîte à feu à l'extrémité opposée de la chaudière, sont entourés par l'eau qu'elle contient. La flamme les traverse et se rend dans *la boîte à fumée* DV que surmonte la cheminée. En *p* est une large porte que l'on ouvre pour nettoyer les tubes. La *fig.* 761 représente une coupe transversale à travers la boîte à fumée ; on y voit les

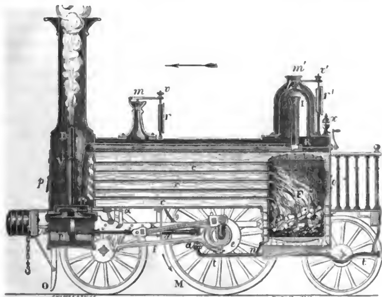
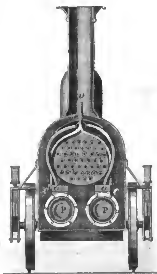


Fig. 760.

extrémités des tubes. *m*, *m'* (*fig.* 760) sont des soupapes de sûreté, chargées par des ressorts *r*, *r'*, dont on peut faire varier la tension au moyen de vis *v*, *v'*. Cette tension est mesurée par une graduation. En *x* est un sifflet pour les signaux ; il est semblable à celui de la *fig.* 753, seulement il est muni d'un robinet placé à la portée du mécanicien. P est un des deux corps de pompe qui sont placés l'un à côté de l'autre au-dessous de la boîte à fumée. L'extrémité de la tige du piston est guidée par une glissière fixe ; elle agit, par l'intermédiaire de la bielle K, sur l'une des manivelles de l'essieu des roues motrices M. La distribution de la vapeur se fait au moyen d'un tiroir à coquille, dont on voit la coupe au-dessus du corps de pompe P. La tige de ce tiroir est guidée en α et reçoit son mouvement, d'un levier conduit par la bielle *f* et l'excentrique *e*.

aa est la pompe d'alimentation, dont le piston plongeur est lié à l'extrémité de la tige du piston P. L'eau est refoulée dans la chaudière par le tube θ, et vient, par le tube *tt*, d'un réservoir placé sur un wagon d'approvisionnement nommé *tender*, qui suit toujours la locomotive. La prise de vapeur se fait par l'extrémité I d'un tuyau, qui s'élève dans l'intérieur d'un dôme, afin de diminuer la quantité d'eau entraînée par la vapeur. Ce tuyau, coudé en R, traverse la chambre à vapeur de la chaudière et, arrivé à la boîte à fumée, se bifurque et envoie ses deux branches aux deux corps de pompe. Ces branches se voient en *oo* (*fig.* 761). En R (*fig.* 760) est un robinet, destiné à régler l'entrée de la vapeur; sa tige passe au-dehors à travers une boîte à étoupe, et elle porte un levier au moyen duquel on la fait tourner. Au lieu d'un robinet, on emploie souvent différents systèmes de vannes, comme en V (*fig.* 764).


Fig. 761.

La vapeur, après avoir agi dans les corps de pompe, s'échappe par les tubes *cv*, *c'v* (*fig.* 761), V (*fig.* 760), qui la conduisent dans la cheminée, par la tuyère D. Cette vapeur sortant à haute pression, et à des instants très rapprochés, puisqu'à chaque tour de roue il y a quatre sorties, il se fait une espèce de tirage artificiel qui supplée au défaut de longueur de la cheminée, nécessairement très courte, et force la flamme à franchir les tubes qui traversent la chaudière. Ce tirage artificiel n'a lieu que pendant la marche, et il est d'autant plus énergique que la vitesse est plus grande, et par suite, que la vapeur est plus rapidement dépensée. Remarquons aussi que le choc de l'air en *n* (*fig.* 760) produit une véritable insufflation, d'autant plus prononcée que la locomotive marche plus vite, la cheminée en avant.

L'idée d'employer un jet de vapeur pour activer le tirage est très ancienne. Philibert Delorme conseille, d'après Vitruve, de placer dans les cheminées, des éolipyles dont le *vent* entraînera vivement la fumée. En 1818, Monoury d'Ectot construisit une machine soufflante dans laquelle un jet de vapeur entraînait l'air à travers un tuyau. Pelletan se servit de ce moyen pour augmenter le tirage dans les cheminées de certaines machines à vapeur; Stephenson l'appliqua aux locomotives.

Châssis. — La chaudière et tout le mécanisme de la locomotive sont fixés à un cadre en fer, ou en bois garni de fer, qu'on appelle le *châssis*. On voit dans la *fig.* 761 les bandes de fer obliques ou oreilles, qui servent à fixer la

chaudière au châssis. Ce dernier, qui soutient ainsi tout l'appareil, s'appuie sur les essieux tournants des roues, par l'intermédiaire de puissants ressorts en acier. En O (*fig.* 760) est le *chasse-pierre*, destiné à écarter les obstacles qui pourraient se trouver sur les rails.

Dans la locomotive que nous venons de décrire, les corps de pompe sont placés entre les roues, dont l'essieu doit être deux fois coudé en forme de manivelle, ce qui présente de sérieuses difficultés dans les appareils de grandes dimensions. De plus, les boîtes de distribution et la plus grande partie du mécanisme se trouvant au-dessous de la chaudière, la surveillance et le graissage ne peuvent se faire pendant la marche et restent toujours assez difficiles pendant le repos. Aujourd'hui, on s'accorde généralement à placer les cylindres en dehors des roues ; alors le châssis est notablement modifié.

1024. Changement de marche. — Une locomotive doit pouvoir à volonté marcher en avant ou en arrière. Il faut de plus que le mécanicien puisse opérer



Fig. 762.

le changement, de la place qu'il occupe derrière la boîte à feu. Un des systèmes employés pour cela se voit dans la *fig.* 762. L'excentrique *e* conduit une double fourchette fixée à l'extrémité de la bielle *da*. La partie *ba* de cette bielle est guidée par un galet *c*, fixé à l'extrémité d'un bras de levier *co* pouvant tourner autour de l'axe *oo'*. *t* est la tige du tiroir ; elle reçoit son mouvement d'oscillation, d'un bras de levier fixé en *o"* à un arbre horizontal. Cet arbre porte un levier $\alpha\beta$ mobile autour du même axe, qui passe par son milieu Le levier $\alpha\beta$ est formé de deux parties parallèles, entre lesquelles est engagée la double fourchette, et qui sont réunies à leurs deux extrémités par un boulon. Quand l'extrémité α est enfoncée dans une encoche pratiquée dans l'angle de la fourchette supérieure, le tiroir fonctionne de manière à produire la marche directe. Pour marcher en arrière, on abaisse la double fourchette ; le boulon β est poussé, pendant cet abaissement, par le plan incliné que forme l'une des branches de la fourchette inférieure, de manière que le tiroir prend une position opposée à celle qu'il avait d'abord. Le mouvement qu'il reçoit ensuite de l'excentrique *e* est inverse de celui qu'il recevait quand la bielle *da* agissait en α. Pour élever ou abaisser la double fourchette, le mécanicien fait varier la position du bouton c en agissant sur le bras de levier *oc*, au moyen de la barre L, dont il arrête ensuite l'extrémité supérieure dans la position convenable.

Souvent on se sert de deux excentriques, calées de manière à pousser en sens opposé les bielles qu'elles commandent. Ces bielles portent des fourchettes munies d'encoches. On engage l'encoche de l'une ou l'autre de ces fourchettes dans l'extrémité d'un bras de levier qui mène le tiroir.

Glissière Stephenson. — La *fig.* 763 représente un autre système, nommé *glissière Stephenson*, qui offre l'avantage de permettre de faire varier la détente pendant la marche. Deux excentriques opposés *e*, *e'* sont fixés à l'arbre des roues motrices; ils font mouvoir les deux bielles B, B' articulées avec une glissière *mn* en forme d'arc, dont le centre est sur l'axe des roues. Cet arc oscille autour d'un point placé vers son milieu. *t* est la tige du tiroir;

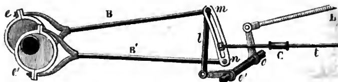


Fig. 763.

elle est guidée en C et reçoit un mouvement de va et vient de l'arc *mn*. L'étendue et le sens de ce mouvement dépendent de la position qu'occupe sur l'arc, l'extrémité de la tige du tiroir. Pour faire varier cette position, on soulève plus ou moins l'arc *mn* au moyen de la barre articulée *l* et d'un levier mobile autour de l'axe *oo'*, sur lequel on agit au moyen de la barre L. A l'extrémité de cette barre se trouve un levier à verrou que l'on fixe dans la position voulue, au moyen d'un arc à crans disposé comme celui de la *fig.* 738.

Souvent le point d'articulation de l'extrémité inférieure de la barre *l* est fixe, et le levier *o'* soulève plus ou moins l'extrémité d'une bielle qui agit sur la tige du tiroir, comme dans la *fig.* 738. La *fig.* 764 représente cette disposition dans une locomotive où tout le système mobile est extérieur; le châssis porte sur les essieux, entre les roues, et les excentriques, *e*, sont fixés en avant de la manivelle, en un point placé sur le prolongement de l'arbre des roues motrices. Ces excentriques agissent sur l'arc *a*, soutenu par le levier *l* articulé au point fixe *o*. Cet arc fait mouvoir la bielle *c* du tiroir. Cette bielle, dont l'extrémité glisse dans l'arc *a*, est articulée à une barre courbe *n*L, que le mécanicien peut soulever plus ou moins par l'intermédiaire du bras de levier L, sur lequel il agit au moyen d'une longue tringle qui tire un bras de levier fixé au même arbre que le bras L, comme en *o'o*, dans la *fig.* 763. P (*fig.* 764) est la pompe d'alimentation mise en jeu par la tige du piston; en *s* et *s'* sont les soupapes. *m* est la bielle qui transmet le mouvement du piston à la manivelle de la roue motrice.

1025. Vaporisation. — La chaudière des locomotives se compose de deux parties, la caisse à feu, et le corps cylindrique dans lequel se trouvent

les tubes à fumée, ordinairement au nombre de 100 à 125, et dont le diamètre varie de 4 à 5cm. La surface de la caisse à feu se nomme *surface de chauffe directe*. C'est par cette surface que se produit la plus grande quantité de vapeur par décimètre carré, lorsque la machine est en repos; mais quand elle est en marche, la surface des tubes donne autant de vapeur, à aire égale, parce que la flamme les traverse et arrive jusqu'à leur extrémité. M. de Pambour a reconnu que la vaporisation pendant la marche est environ cinq fois plus rapide qu'à l'état de repos; elle s'accroît quand la vitesse augmente; le jet de vapeur qui produit le tirage, et l'insufflation sous la grille par le choc de l'air, agissant alors plus activement. Pour obtenir la vaporisation la plus

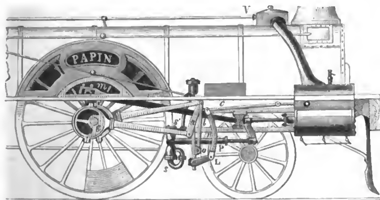


Fig. 764.

rapide, il faut que l'ouverture par laquelle la vapeur se précipite dans la cheminée, soit telle que la flamme arrive jusqu'aux extrémités des tubes, sans les dépasser.

La quantité de vapeur produite par heure et par mètre carré de surface de chauffe est généralement de 60 à 65kil à peu près pendant la marche; 1kil de coke vaporisant 5 ou 6kil d'eau. L'effet utile du combustible augmente quand la surface des tubes augmente elle-même par rapport à la surface de la caisse à feu. C'est pourquoi Stephenson a allongé le corps cylindrique de manière à porter la surface de chauffe à près de 75m carrés, sans augmenter les dimensions du foyer. Mais alors la locomotive acquérant une grande longueur, il a fallu rapprocher les six roues sous le corps cylindrique, pour éviter une trop grande résistance dans les courbes du chemin de fer. La caisse à feu se trouve alors soutenue en porte-à-faux par le châssis. Depuis, la surface de chauffe a été encore augmentée: on l'a portée à plus de 100m carrés.

La tension de la vapeur dans les locomotives, dans le principe de 3 atmosphères seulement, varie aujourd'hui de 5 à 9 atmosphères.

La prise de vapeur se fait dans la partie supérieure d'un dôme, afin de diminuer la quantité d'eau entraînée mécaniquement; les uns la placent au-dessus de la boîte à feu, les autres tout près de la boîte à fumée, où le bouillonnement de l'eau est moins prononcé qu'au-dessus de la caisse à feu. La quantité d'eau entraînée est, généralement, de 30 pour cent de la vaporisation totale; elle peut aller, dans certains cas, à 50 pour cent, et même au-delà.

1026. De la puissance des locomotives. — La vapeur, dans les locomotives, agit pour faire tourner les roues; si la machine avance, c'est qu'il y a adhérence aux rails. Si elle était retenue par un obstacle fixe, les roues tourneraient sur place en glissant sur les rails, et il n'y aurait pas de mouvement de translation. On conçoit qu'il en sera de même si la résistance à vaincre est trop considérable. L'adhérence des roues motrices aux rails est proportionnelle à la charge qu'elles supportent.

Calcul de la traction. — D'après les expériences de M. de Pambour, la résistance suffisante pour que les roues tournent sur elles-mêmes est $\frac{1}{6}$ du poids qu'elles supportent quand les rails sont secs; elle peut descendre à $\frac{1}{10}$ dans les temps très humides. Le poids de la locomotive a donc une grande influence, indépendamment de sa puissance mécanique, sur la charge qu'elle peut remorquer. La *fusée* de Stephenson ne pesait que 4500^{kil}. Aujourd'hui, les locomotives pèsent généralement de 15 à 30 tonnes de 1000^{kil}; mais les roues motrices ne portent qu'une partie de cette charge.

Il résulte des expériences de M. de Pambour que l'effort de traction à exercer pour faire marcher un wagon sur des rails de niveau est indépendant de la vitesse et égal à $\frac{1}{233}$ de son poids, c'est-à-dire à 4^k environ par tonne[1]. Supposons que les roues motrices de la locomotive supportent un poids de 10 tonnes, la machine pourra exercer un effort de $\frac{10000}{6} = 1666$ kilos sur des rails secs. Or, un convoi, pour résister avec une force égale, sur des rails horizontaux, devrait peser un nombre de tonnes x donné par l'équation $x = \frac{1666}{4} = 416{,}5$, puisqu'une tonne correspond à une résistance de 4 kil. Cette valeur correspond à l'état d'équilibre; la charge à remorquer devra donc être au-dessous de cette limite, et d'autant plus que la vitesse demandée sera plus grande. Du reste, il y a toujours un peu de glissement, et l'espace parcouru est toujours moindre que celui que l'on obtient en multipliant la circonférence des roues motrices par le nombre de tours. Cette perte dépend de l'état des rails; elle est très marquée quand ils sont humides; on dit, dans ce cas, que la locomotive *patine*. — Quand on veut remorquer de lourds convois, ou franchir de fortes rampes, on donne le même diamètre aux six roues, et on les réunit par des bielles articulées à des manivelles égales, de manière que les pistons impriment le mouvement aux six roues, et qu'il y a six points d'adhérence sur les rails, au lieu de deux. Souvent on réunit ainsi quatre roues

[1] Cet effort est de 16 kil. sur un pavé uni, et de 30 à 60 kil. sur une route ferrée suivant qu'elle est en bon ou en mauvais état.

seulement. On a fait des locomotives à petite vitesse pour les marchandises, ayant 8, 12 et même 14 roues égales, ainsi réunies.

Pour calculer, en chevaux, la puissance que doit avoir une locomotive pour remorquer n tonnes avec une vitesse de K kilomètres par heure, il faut évaluer le travail correspondant. Or, l'effort de traction est égal à $n \times 4$ kilogrammes ; la vitesse ou l'espace parcouru en 1ˢ est $K\,\frac{1000}{3600} = \frac{5}{18}\,K$, en mètres. Le travail est donc $\frac{5}{18}\,K \times n\,.\,4$ ou $\frac{10}{9}\,nK$. Autant il y aura de fois 75 kilogrammètres dans cette quantité, autant la machine devra représenter de chevaux-vapeurs. On voit que la puissance de la machine doit être proportionnelle à la vitesse et à la charge qu'elle doit remorquer. Si nous supposons cette charge égale à 100 tonnes, et la vitesse K égale à 10 lieues ou 40 kilomètres par heure, la force de la machine devra être de $\frac{4444}{75}$, ou 59 chevaux à peu près.

1027. Locomotives à grande vitesse. — Les locomotives des trains de voyageurs, beaucoup moins puissantes que celles des marchandises, doivent, pour

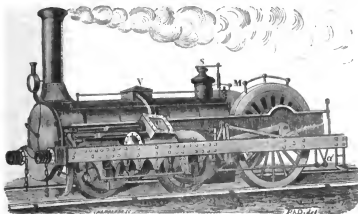


Fig. 765.

fournir de grandes vitesses, avoir les roues motrices d'un grand diamètre, afin qu'à chaque tour corresponde un déplacement considérable. Mais cette condition a été pendant longtemps difficile à réaliser ; parce que l'essieu étant au-dessous du corps cylindrique de la chaudière, on ne pouvait augmenter le diamètre des roues sans élever en même temps le centre de gravité de la machine, ce qui nuisait à sa stabilité. En 1851, M. Crampton a levé cette difficulté en plaçant les roues motrices en arrière de la chaudière.

Locomotives Crampton. — La *fig.* 765 représente une locomotive ainsi disposée. Les roues motrices peuvent avoir un diamètre de plus de 2ᵐ, et fournir des vitesses de plus de 110 à 120 kilomètres par heure. De plus, ces locomotives, dont le centre de gravité peut être facilement abaissé, sont construites sur un plan nouveau dont nous indiquerons les dispositions générales. Tout le

mécanisme est extérieur, de manière qu'on peut, même pendant la marche, en surveiller les différentes parties et procéder au graissage. Cette disposition a souvent été imitée depuis; nous en avons vu plus haut un exemple (*fig.* 764). La chaudière de la locomotive Crampton, porte 120 tubes; *s* est la soupape de sûreté; V la prise de vapeur, et *v* la boîte de distribution placée au-dessus du corps de pompe, qui est extérieur. Le tube *o* conduit dans la cheminée la vapeur qui a agi. *a* est la pompe d'alimentation qui aspire par le tube *a'* l'eau que porte le tender. M indique la place du mécanicien entre les deux roues motrices. On voit, dans la figure, la bielle qui imprime le mouvement aux roues et une partie de la glissière de Stephenson. La machine pèse 26 tonnes. En avant des roues motrices sont quatre autres roues plus petites. La charge est répartie de manière que les roues motrices portent 16 tonnes, et les quatre autres 10 tonnes. Il en résulte que ces dernières, fortement chargées, ne sont pas exposées à éprouver des ressauts, et par suite à *dérailler*, quand il se trouve quelque corps étranger sur les rails; ce qui peut avoir lieu quand l'essieu des roues motrices est placé à peu près au-dessous du centre de gravité. Il résulte aussi de cette dernière position de l'essieu, qu'il se fait, autour d'une ligne qui lui est parallèle et passe par le centre de gravité, des oscillations facilitées par la flexibilité des ressorts, et connues sous le nom de mouvement de galop, qui peuvent faire sauter les roues antérieures hors des rails.

L'invention des locomotives est toute récente; ce n'est qu'en 1829 que la première machine à chaudière tubulaire a été construite. En 1800, il n'y avait pas un seul chemin de fer sur le globe, et aujourd'hui ils sont répandus dans toutes les parties du monde; il n'est donc pas étonnant de voir chaque jour les locomotives se perfectionner, et leur construction présenter des dispositions aussi variées. Les plus grandes que l'on ait encore construites sont celles du chemin de fer le *Great-Western*, en Angleterre, dont les rails, beaucoup plus écartés que ceux des autres lignes, sont éloignés de 2^m^,134. Nous citerons une machine de la force de 100 chevaux remorquant 120 tonnes avec une vitesse de 80 kilomètres par heure, et pesant 31 tonnes quand elle est vide; elle pèse 4 tonnes de plus quand elle est remplie d'eau et de charbon. Le diamètre des roues est de 2^m^,50, et la longueur de la machine, de 7^m^,30. Il y en a de plus puissantes encore pour les trains de marchandises.

1028. On a plusieurs fois construit des machines marchant sur les routes ordinaires. Dans ce cas, il n'y a que quatre roues, et l'essieu de celles de devant peut tourner autour d'une cheville-ouvrière, de manière qu'on puisse diriger l'appareil. Les premières machines de cette nature que l'on a essayées, n'ont pu fonctionner que pendant peu de temps. Il paraît qu'elles étaient promptement mises hors de service par les secousses produites par les inégalités du sol. Depuis quelque temps, on voit circuler dans les rues de Londres des locomotives remorquant de lourds chariots, et qui, suspendues sur des ressorts bien établis, paraissent devoir résister à l'influence des secousses produites par les inégalités de la route.

IV. De quelques machines dont le jeu est semblable à celui des moteurs à vapeur.

1029. On a fait de fréquentes tentatives pour remplacer la force expansive de la vapeur par celle de différents gaz. On a essayé le gaz hydrogène, dont on se débarrassait à la sortie du corps de pompe en l'enflammant; l'acide carbonique, le gaz ammoniac, que l'on faisait disparaître, l'un en le dissolvant dans l'eau de chaux, et l'autre dans l'eau pure. On a voulu aussi revenir à l'emploi de la poudre, anciennement essayée par Huyghens et Papin. Mais tous ces essais n'ont pas donné de résultats assez décisifs pour qu'on ait pu en tirer parti dans l'industrie.

Machines à air comprimé. — M. Andraud a construit et fait marcher sur des rails, des machines dont le jeu est analogue à celui des locomotives; seulement les corps de pompe reçoivent, au lieu de vapeur, de l'air comprimé à l'avance dans un vaste réservoir en fer que porte la machine. Un robinet, très peu ouvert d'abord et qui s'ouvre graduellement de plus en plus, permet d'obtenir une force constante, avec un gaz dont la tension va nécessairement en diminuant. On voit que ces machines n'engendrent pas de travail, mais qu'elles ne font que reproduire, pendant la marche, celui qu'il a fallu dépenser pour comprimer l'air. C'est un moyen d'emmagasiner dans le réservoir de la machine, de manière qu'elle la transporte avec elle, la force destinée à la faire marcher.

Machines à air dilaté. — Il y a longtemps qu'on a songé à remplacer la tension de la vapeur par la force expansive de l'air échauffé. On se propose principalement, dans cette substitution, d'économiser la grande quantité de chaleur qui passe à l'état latent dans la formation de la vapeur. Mongolfier, le premier, a fait usage de la force élastique de l'air dilaté. J. Niepce a tenté, depuis, quelques essais à ce sujet. Enfin, M. Ericsson vient de construire, en Amérique, une machine à air chaud destinée à faire mouvoir un navire; la chaleur est fournie à l'air par des toiles métalliques fortement chauffées, que ce gaz est forcé de traverser. Après avoir poussé un piston, l'air repasse à travers les mêmes toiles, et leur cède une partie de la chaleur qui lui reste. Une semblable machine est souvent nommée *machine calorique*.

Depuis ces grandes expériences, de nombreuses recherches ont été faites sur les machines à air dilaté; mais nous n'entrerons pas dans de plus grands détails à ce sujet, l'expérience n'ayant pas encore prononcé d'une manière définitive, sur les avantages que présentent ces sortes d'appareils.

1030. Moteur à gaz. — Ce nouveau moteur, qui donne déjà des résultats très remarquables, peut être considéré comme réalisant de la manière la plus heureuse une machine à gaz dilaté. Ici, le gaz, formé d'un mélange d'air et de gaz d'éclairage, s'échauffe dans le corps de pompe même. en s'enflammant sous

l'influence d'étincelles électriques. On avait déjà essayé d'employer l'expansion produite par un mélange explosif, mais une foule de difficultés avaient empêché d'obtenir des résultats satisfaisants. M. Lenoir, avec l'aide d'un constructeur habile et persévérant, M. Marinoni, est parvenu à vaincre tous les obstacles, et à établir une machine pratique, généralement désignée sous le nom de *moteur à gaz*, dans laquelle l'impulsion est imprimée à un piston par l'expansion d'un gaz échauffé par sa propre combustion.

La *fig.* 766 représente le moteur à gaz. P est le piston, dont la tige agit, par l'intermédiaire d'une bielle *b*, sur l'arbre d'un volant V. Deux tiroirs T, T′ sont placés de chaque côté du corps de pompe; ils sont mis en mouvement

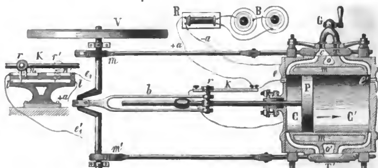


Fig. 766.

par des excentriques *m*, *m′* affermis sur l'arbre du volant. L'un de ces tiroirs, T, est destiné à régler l'introduction du mélange gazeux ; l'autre, T′, laisse sortir les gaz qui ont produit leur effet. Pour faire partir la machine, on commence par agir sur le volant, de manière à déplacer le piston, par exemple, dans le sens de la flèche ; l'air est alors aspiré par l'ouverture *o*, qui communique avec l'atmosphère, et le gaz inflammable par le canal *c*, qui vient se placer en face d'une ouverture qui communique avec le tuyau G qui amène ce gaz. Les ouvertures sont telles, qu'il se mêle à l'air dans la proportion de 10 volumes contre 90 d'air. Bientôt le mouvement du tiroir ferme tous les passages, et alors une série d'étincelles électriques jaillissent en *e*, et enflamment le mélange, qui imprime une impulsion énergique au piston, à cause de la température très élevée produite par la combustion. Pendant ce temps, l'air logé en C′ s'échappe en *o′*.

Quand le piston est arrivé à l'extrémité de sa course, il revient sur ses pas en vertu de la vitesse acquise du volant, le tiroir T s'est déplacé, et l'air et le gaz sont aspirés en C′, jusqu'à ce que le tiroir fermant tous les passages, et les étincelles jaillissant en *e′*, le mélange gazeux s'enflamme et donne au piston

une nouvelle impulsion qu'il communique au volant, pendant que les gaz logés en C s'échappent par le tiroir T', qui s'est placé de manière à leur donner issue.

Le calcul approximatif du travail dynamique de l'appareil a été donné par M. Hirn [1].

Comme le corps de pompe s'échauffe rapidement, il est muni d'une double enveloppe dans laquelle circule continuellement de l'eau. Le liquide partant d'un réservoir placé à quelques mètres de hauteur, arrive au bas de l'espace *mm*, et après s'être échauffé, monte en vertu de sa légèreté spécifique, par un second tuyau qui le ramène à la partie supérieure du réservoir. On a ainsi une circulation d'eau chaude qui peut être utilisée dans une foule d'industries, et être employée à alimenter sans frais un calorimètre.

Étincelles électriques. — Pour comprendre comment se produisent les étincelles destinées à enflammer le mélange gazeux, il faut connaître différents appareils que nous décrirons dans le 3e volume, et que nous ne ferons ici que nommer. L'électricité est fournie par deux *couples de Bunsen* B, qui mettent en activité une *bobine d'induction* de Ruhmkorff R. Le réophore négatif —*a* communique avec le corps de pompe, et le réophore positif +*a*, avec un *commutateur* que l'on voit en *k* au-dessous de la tige du piston, et qui est représenté à part, et en élévation en K. En *e*, sont des fils de platine dont les extrémités très rapprochées sont en dedans du corps de pompe, avec lequel l'un d'eux communique, tandis que l'autre en est séparé par un corps isolant. Ce dernier communique avec une lame de cuivre *n*. La même disposition se trouve en *e'*, seulement le fil de platine isolé communique avec une autre lame *n'* séparée de la première et isolée comme elle. Le réophore positif +*a* communique avec une autre lame isolée et parallèle aux deux premières *ll*. La tige du piston porte un double ressort en cuivre *r*, dont une branche glisse sur la lame *ll*, et l'autre sur les lames *n* et *n'*. Quand le ressort est en *r*, l'électricité passe de *ll* en *n*, et l'étincelle jaillit en *e*. Quand le piston, dans son mouvement, amène le ressort en *r'*, l'électricité passe de *ll* en *n'*, et les étincelles jaillissent en *e'*.

C'est en 1860 qu'on a vu fonctionner les premières *machines Lenoir*. D'après des expériences précises, ces appareils ne dépensent pas plus de 1 mètre cube de gaz par heure et par cheval, soit 30 centimes, au prix du gaz à Paris. Une machine à vapeur de 4 chevaux dépense environ 5kil de charbon par heure et par cheval, coûtant 20 centimes. Mais les dépenses accessoires sont telles que le moteur à gaz l'emporte notablement au point de vue de l'économie, que l'on évalue à 5 francs par jour environ, dans le cas d'une force de 4 chevaux. Ici nous avons un moteur toujours prêt à marcher, ne produisant aucune dépense dès qu'il est arrêté ; plus de fourneau massif avec sa longue cheminée ; plus de chaudière avec ses chances d'explosion ; plus de provision encombrante de charbon ; plus de chauffeur, ni d'appareils de sûreté à surveiller.

[1] Cosmos, *Revue des progrès des sciences*, t. XVII, p. 617 ; et t. XVIII, p. 12.

Il suffit d'un simple tuyau partant des conduites à gaz de la rue. L'appareil moteur peut s'installer dans un coin de l'atelier où il doit être utilisé, et l'on a ainsi la solution la plus inattendue de la distribution des petites forces à domicile.

Une des conditions de succès réside dans la proportion de gaz mélangé à l'air. Tel qu'il est constitué, le mélange ne donne pas pour ainsi dire d'explosion. Il n'y a ni choc ni secousse. La force d'expansion, qui représente environ 6 atmosphères, n'est ni plus grande ni plus brusque que celle que produit la vapeur à la même pression en se précipitant dans un corps de pompe. On a eu l'idée d'injecter à chaque coup de piston, dans le corps de pompe, quelques gouttes d'eau, qui, se réduisant en vapeur, augmentent la détente, et ajoutent au travail produit, sans frais nouveaux.

Dans les grandes usines, on pourra fabriquer le gaz inflammable à bas prix, n'ayant pas de frais de canalisation, et n'ayant pas à se préoccuper de ses qualités éclairantes. M. Isoard tire de la vapeur d'eau surchauffée unie au goudron de houille et décomposée dans des tubes de fer portés au rouge, un gaz très éclairant et ne revenant pas à 1 centime le mètre cube. Enfin, l'on peut remplacer le gaz inflammable par des vapeurs d'huiles essentielles provenant de la distillation des goudrons ou des chistes bitumineux ; une fois la machine en train, la chaleur de l'eau qui circule autour du corps de pompe suffit pour vaporiser l'huile. Les bateaux à vapeur, les locomotives, se chargeraient de ces huiles au lieu d'emporter du charbon. M. Lenoir a construit une voiture qui marche au moyen de son appareil, et sur laquelle il a employé de ces huiles.

On a émis des doutes sur la possibilité de construire des moteurs à gaz d'une grande force ; mais on ne voit pas ce qui pourrait en empêcher. En outre, on a déjà construit une machine de 8 chevaux donnant de très bons résultats. Au reste, en supposant que la grandeur du corps de pompe fût limitée par quelque cause imprévue, rien n'empêcherait de réunir plusieurs corps de pompe dont les pistons agiraient sur le même arbre, de manière à fournir le travail demandé.

CHAPITRE VII.

SOURCES DE CHALEUR.

..... Videamus quemadmodum apud nos fieri soleat ignis..... Duobus modis: uno, si excitatur sicut ex lapide percusso: altero, si attritu invenitur, sicut cùm duo ligna inter se diutiùs trita sunt.
(SENEC., *Quæst. nat.*, lib. II, cap. 22.)

1031. La chaleur, comme nous l'avons déjà dit, ne peut exister sans la matière pondérable (686); elle provient donc toujours d'un corps dans lequel elle prend naissance sous l'influence de différentes causes, que l'on nomme *sources de chaleur*. Un corps chaud qui cède de la chaleur par rayonnement ou par contact aux corps environnants se trouve constitué momentanément, par rapport à ces derniers, à l'état de source de chaleur. Toute cause qui enlève, au contraire, de la chaleur aux corps, est une *source de froid*. Un corps dont la température est très basse se comporte donc comme source de froid par rapport aux objets environnants.

On peut diviser les différentes sources de chaleur en trois classes : 1° les *sources permanentes*, comme le soleil, et le globe terrestre, qui possède, comme nous le verrons, une chaleur propre qui passe lentement de son intérieur dans ses couches superficielles. 2° Les *sources accidentelles* ou *artificielles*, comme les actions mécaniques, les actions chimiques. On peut dire, en général, que toutes les fois qu'on change l'état d'équilibre des molécules d'un corps, on produit de la chaleur, ou du froid. 3° Les *sources physiologiques*; les animaux et même certains végétaux produisent de la chaleur pendant la vie. 4° Enfin, il est encore une source de chaleur que nous ne devons pas omettre de signaler, quoique nous ne puissions en parler que dans le livre suivant; c'est l'*électricité*.

Pour produire du froid, on emploie différents moyens qui reviennent presque tous à rendre latente une partie de la chaleur sensible que contiennent les

corps, comme nous en avons vu des exemples dans les mélanges réfrigérants (925), et dans le froid produit par l'évaporation (939). On peut encore refroidir un corps en le plaçant dans un milieu de température inférieure à la sienne, ou en l'exposant au rayonnement vers des corps plus froids que lui.

§ 1. — SOURCES ARTIFICIELLES DE CHALEUR.

I. Actions mécaniques.

1032. FROTTEMENT. — Les actions mécaniques au moyen desquelles on peut produire de la chaleur sont principalement le *frottement*, la *compression*, et toutes les opérations par lesquelles on peut déformer les corps. Occupons-nous d'abord du frottement.

Quand on presse deux surfaces l'une contre l'autre, les aspérités dont elles sont recouvertes, quelque polies qu'elles soient, s'engagent les unes dans les autres ; d'où il résulte, quand on veut les faire glisser l'une sur l'autre, une résistance d'autant plus grande que les aspérités sont plus prononcées et la pression plus forte. Pour que le glissement ait lieu, il faut que les parties engagées les unes dans les autres se séparent ; ce qui ne peut avoir lieu sans un ébranlement des couches superficielles, accompagné d'un dégagement de chaleur. Par exemple, en frottant les mains l'une contre l'autre, on les échauffe. Si l'on frotte avec force deux morceaux de bois l'un sur l'autre, il s'en dégage une épaisse fumée. L'expérience se fait facilement en faisant tourner rapidement avec un archet, un fuseau en bois dont on appuie la pointe sur une planche. Les sauvages parviennent à allumer du feu en faisant tourner entre leurs mains une tige de bois dur, comme du bois de fer, dont ils enfoncent l'extrémité, taillée en pointe, dans une cavité d'un morceau de bois d'une autre espèce. Sénèque rapporte que les bergers de son temps obtenaient du feu par le même procédé, et il ajoute qu'il faut, pour réussir, employer des bois d'espèce particulière, comme le laurier et le lierre. C'est par le frottement qu'on obtient ces filets bruns que l'on voit sur certains objets travaillés au tour : on appuie fortement l'angle d'un fragment de bois, sur la pièce tournant rapidement, et le bois fume et se charbonne le long de la circonférence frottée.

Les tourillons des machines, les essieux des voitures s'échauffent quand on néglige de les graisser ; et l'on voit quelquefois le moyeu des roues prendre feu quand le mouvement est rapide et prolongé. — On fait des *briquets phosphoriques* consistant simplement en un tube de plomb ou de verre, au fond duquel on a mis un peu de phosphore, dont on arrache quelques parcelles avec

le bout d'une allumette; en la frottant ensuite sur un morceau de liége, le phosphore s'enflamme et met le feu au soufre de l'allumette.

Briquet à pierre. — Les étincelles que l'on fait jaillir quand on frappe tangentiellement une lame d'acier trempé contre le tranchant d'une pierre à fusil, sont dues à la chaleur que produit le frottement énergique que l'on exerce par ce moyen. Dans cette expérience, le silex entame l'acier, en arrache des parcelles, qui sont portées à une température assez élevée pour s'enflammer et brûler au contact de l'air. En tombant sur de l'amadou, sur de la poudre, elles y mettent le feu. Si l'on place une feuille de papier au-dessous du silex avec lequel on *bat le briquet*, on y trouve des parcelles qui, vues au microscope, présentent différentes apparences : les unes sont de petits fragments anguleux de silex ; les autres des grains de limaille d'acier qui n'ont pas été brûlés et ont conservé leur forme irrégulière ; d'autres sont noires, de forme parfaitement sphérique, elles se sont oxydées aux dépens de l'oxygène de l'air, et ont été fondues. Du reste, la fusion n'est pas produite seulement par la chaleur dégagée dans le frottement, mais encore par celle qui résulte de la combustion dans l'air. En effet, Hawksbée a montré que, dans le vide, les parcelles sphériques ne se produisent plus. Hook paraît avoir, le premier, examiné au microscope les fragments qui se détachent du briquet, et les explications qui précèdent sont dues à Réaumur. Au lieu de silex, on peut employer toute substance capable d'entamer l'acier : comme la porcelaine, certaines poteries, la pyrite de fer, que les Romains portaient avec eux en campagne pour se procurer du feu ; d'où est venu le nom de *pyrite*. Dire qu'une substance fait feu au briquet, c'est donc dire qu'elle est plus dure que l'acier trempé.

On explique de la même manière que pour le briquet, les étincelles que le fer des chevaux fait jaillir sur les pavés, celles qui s'échappent des meules sur lesquelles on aiguise les outils. Si l'on n'a pas soin de mouiller la meule, l'acier s'échauffe et prend une teinte bleue qui atteste que la chaleur dégagée par le frottement a détruit une partie de la trempe. On peut ainsi faire rougir des lames d'acier, et Wedgwood a pu, par le même moyen, faire rougir l'angle d'un fragment de verre. Avant l'invention de la *lampe de sûreté* des mineurs, on éclairait les galeries dans lesquelles il se dégageait des gaz inflammables, au moyen d'une roue en acier tournant rapidement, et sur laquelle s'appuyait un silex, d'où s'élançait constamment une gerbe d'étincelles assez vives, mais incapables d'enflammer les gaz.

Quand on lime un morceau de fer, la lime s'échauffe, et il en est de même de la limaille formée. Si l'on remplace le fer par un alliage d'antimoine et de fer, chaque parcelle enlevée s'enflamme au contact de l'air ; de sorte qu'on voit jaillir une gerbe d'étincelles à chaque coup de lime. Remarquons que, dans cette expérience, comme dans celle du briquet, il y a, indépendamment du frottement, des chocs et des compressions auxquels on doit attribuer une partie de la chaleur produite, comme nous le verrons bientôt.

1033. De la quantité de chaleur produite par le frottement. — On peut, par le frottement, dégager indéfiniment de la chaleur. On n'a pas pu jusqu'à présent évaluer exactement la quantité dégagée par deux corps frottés l'un contre l'autre dans des conditions données. Nous citerons cependant quelques expériences qui démontrent que cette quantité est considérable. Davy ayant frotté deux morceaux de glace l'un contre l'autre dans un lieu dont la température était au-dessous de 0°, parvint à les faire fondre. La quantité de chaleur dégagée était égale au poids de glace fondue multiplié par 79, et l'on aurait pu la calculer, si aucune portion de chaleur ne s'était perdue au dehors.

Rumfort disposa horizontalement une pièce de canon de six, sortant du moule, C (*fig.* 767), sur la machine destinée à la forer. Pendant que la pièce

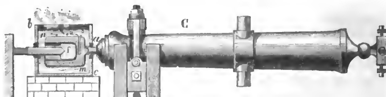


Fig 767.

tournait sur elle-même, il détacha dans la masselotte qui la surmontait un cylindre *nm* qui n'adhérait au corps de la pièce que par une partie très étroite *a*, et il fit forer ce cylindre jusqu'à une certaine profondeur. Il produisit ensuite de la chaleur par le frottement d'un foret obtus *f* en acier trempé pressé au fond de la cavité. La pièce C faisait 32 tours par minute. Dans une expérience, où le foret détacha pendant une demi-heure 45 grammes de parcelles de bronze, un thermomètre enfoncé aussitôt dans un trou que l'on aperçoit dans l'épaisseur du fond du cylindre *nm*, marqua 54° c. ; ce qui correspond à une très grande quantité de chaleur, à cause de l'énorme poids de ce cylindre. — Dans une autre expérience, Rumfort entoura le cylindre *nm* d'une masse d'eau d'environ 10 litres, contenue dans une caisse en bois *bc*, dont la tige du foret, ainsi que le tourillon *a*, traversaient les parois par des boîtes à cuirs. Au bout de deux heures et demie, l'eau entra en ébullition[1].

Rumfort a constaté que la limaille détachée, dans ces expériences, avait la même chaleur spécifique que le bronze massif. On ne peut donc attribuer la chaleur dégagée à un changement de capacité calorifique.

1034. Circonstances qui font varier la quantité de chaleur produite par le frottement. — La quantité de chaleur dégagée dans le frottement dépend : 1° de la nature et de l'état des surfaces frottées ; 2° de la pression ;

[1] *Essais philosophiques*, par B. comte de Rumfort, t. II, p. 495.

3° de la vitesse. M. Haldot a publié des expériences nombreuses sur ce sujet [1]. L'appareil dont il faisait usage était composé d'une plaque de laiton tournant sur elle-même, et pressée contre une autre plaque de substance différente, par un ressort dont on pouvait faire varier la tension. Les deux plaques étaient plongées dans un vase rempli d'eau. Quand la plaque mobile était polie, la quantité de chaleur dégagée était deux fois plus considérable que lorsqu'elle était couverte d'aspérités, résultat auquel on ne se serait pas attendu. Le zinc frotté sur une plaque de laiton, dégagea plus de chaleur que les autres substances. Le plomb et le laiton substitués au zinc, en donnèrent la même quantité, et l'étain, 0,78 de la quantité fournie par le zinc.

On ne sait pas quelle est la part des deux corps en présence, dans la production de la chaleur dégagée par le frottement. Ces corps prennent, de cette chaleur, une partie qui dépend de l'état de leur surface, de leur pouvoir absorbant, de leur conductibilité, de leur masse et de leur capacité calorifique. M. Becquerel a reconnu que deux corps de même substance frottés l'un contre l'autre par des surfaces identiques, s'échauffent également [2]. Pour le constater, il les séparait vivement et les appliquait chacun sur l'une des bases de la pile d'un thermomultiplicateur : l'aiguille du rhéomètre n'était pas déviée. Quand l'une des faces était moins polie que l'autre, l'aiguille était déviée de manière à prouver que la face polie était la moins chaude. La différence dépendait de la vitesse avec laquelle on frottait. Par exemple, les deux disques étant en verre, l'un poli et l'autre dépoli, le premier prit moitié moins de chaleur que le second.

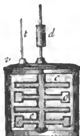


Fig. 768.

Voici encore quelques résultats qui montrent l'influence de la nature des substances : un disque de satin blanc s'échauffe plus qu'un disque de satin noir sur lequel on le frotte, quoique ce dernier ait un plus grand pouvoir absorbant; le verre frotté sur le liége prend plus de chaleur que ce dernier, dans le rapport de 34 à 5; si le verre est dépoli, le rapport est de 40 à 7. Avec l'argent et le liége, ce rapport est de 50 à 12; et avec le caoutchouc et le liége, de 29 à 11.

1035. Frottement des fluides. — Le frottement exercé par l'eau qui coule le long d'un corps solide produit trop peu de chaleur pour qu'on puisse l'apercevoir; le liquide se renouvelant sans cesse, et emportant avec lui le peu de chaleur dégagée. M. Joule a pu cependant obtenir une élévation sensible de température, en opérant sur une masse limitée de liquide [3]. Il faisait tourner dans ce liquide, des palettes en laiton *oo* (*fig.* 768), au nombre de 16, qui

[1] *Journal de Nickolson*, t. XXVI, p. 30.

[2] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XLVI, p. 269.

[3] *Trans. phil.*, 1850, p. 61, et *Ann. de ch. et de ph.*, 3e série, t. XXXV, p. 121.

passaient à travers quatre systèmes de vannes fixes *c, c*, supportées par un cadre en laiton. Ce cadre soutenait en même temps l'axe de rotation, et le tout était introduit dans un calorimétre *vv*, contenant 6 à 7 kil. d'eau. En *d* est une pièce de bois destinée à arrêter la chaleur qui tendait à s'échapper par conductibilité. M. Joule a pu obtenir dans l'eau une élévation de 0°,202. Des expériences semblables, faites sur le mercure avec un appareil en fonte, ont donné jusqu'à 2°,54. Nous aurons occasion de revenir plus loin sur ces expériences remarquables. — Le passage d'un corps à travers l'air est aussi accompagné d'un dégagement de chaleur ; c'est ainsi qu'un boulet de canon s'échauffe de plus en plus à mesure qu'il s'éloigne de la pièce qui l'a lancé. On attribue l'état d'incandescence des *aérolithes* au frottement qu'ils éprouvent dans l'atmosphére, qu'ils traversent avec une vitesse extrême.

1036. De l'origine de la chaleur engendrée par le frottement. — La quantité de chaleur que l'on peut développer en frottant deux corps, est indéfinie. On ne peut l'attribuer à un changement dans la capacité calorifique, comme il ressort des expériences de Rumfort. Elle n'est pas due non plus à



Fig. 769.

une action chimique exercée par l'air à la surface des corps frottés, car Rumfort a opéré à l'abri du contact de l'air, et Pictet a fait des expériences sous le récipient de la machine pneumatique, au moyen de petits godets métalliques contenant un thermométre, et qu'un mouvement d'horlogerie faisait tourner rapidement pendant qu'ils étaient pressés par diverses substances. On est donc forcé d'attribuer la chaleur produite, à l'ébranlement moléculaire qui résulte du frottement. Ces faits ne peuvent s'expliquer dans le système de l'émission, tandis qu'ils sont faciles à concevoir dans le système des ondulations.

1037. Applications. — Rumfort, après avoir décrit les expériences citées plus haut (1033), dit qu'on pourrait utiliser la chaleur développée par le frottement, pour faire cuire des aliments ; mais il ajoute qu'il y aurait plus d'économie à produire cette chaleur en se servant comme combustible des matières employées à nourrir le cheval destiné à faire mouvoir sa machine. Pictet, en rendant compte des expériences de Rumfort, fit remarquer qu'il y aurait avantage réel, si l'on produisait le frottement au moyen de la force d'une chute

d'eau ou de celle du vent. Cette idée a été appliquée en Amérique, où l'on a pu chauffer des poêles avec des plaques de fonte ou de fer qui tournaient pressées l'une contre l'autre. Mais ces plaques s'usant rapidement, le procédé était très dispendieux. La question du chauffage par le frottement a été résolue d'une manière très heureuse par le moyen suivant.

Appareil thermogène. — Cet appareil, imaginé par MM. Beaumont et Mayer, est destiné à transformer de la force motrice en chaleur; c'est le problème inverse de celui dont la machine à vapeur fournit la solution. Une chaudière cylindrique en tôle, de 2 mètres de longueur, placée horizontalement, et dont la *fig.* 769 représente une coupe longitudinale, et la *fig.* 770 une coupe tranversale, est traversée par un tube en cuivre un peu conique, soudé par ses extrémités aux deux bases de la chaudière. Un cône en bois, entouré d'une tresse de chanvre, remplit complètement ce tube, et reçoit un mouvement de rotation sur lui-même, d'une courroie sans fin qui embrasse la poulie P adaptée à un arbre en fer qui le traverse. Des pointes à vis s'enfoncent dans les extrémités de cet arbre, pour régler la pression de la surface du cône sur la surface intérieure du tube de cuivre. De l'huile, venant d'un réservoir *h*, coule par les tubes *t*, *t*, *t*, et vient lubrifier continuellement les surfaces frottées. L'excès de ce liquide s'échappe par le tube *t'* (*fig.* 770). Une corde de vera (I, 206) la reporte dans le vase *h*. De cette manière, les surfaces frottées s'usent très peu, et cependant la quantité de chaleur dégagée ne semble pas diminuée.

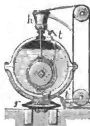


Fig. 770.

Avec une vitesse de 400 tours par minute, il suffit de quelques heures pour porter à 130°, les 400 litres d'eau que contient la chaudière, et produire par suite, de la vapeur ayant une tension de plus de deux atmosphères et demie. Cette vapeur est conduite par un tuyau, dans les appareils que l'on veut chauffer. D'après les inventeurs, la vapeur produite est capable de fournir le travail d'un cheval, quand on dépense celui de deux chevaux pour faire mouvoir l'appareil.

Partout où le combustible est rare et la force motrice abondante, cette machine est appelée à rendre de grands services; et quand on considère quelle immense quantité de force motrice on perd dans une foule d'industries, on conçoit que l'appareil thermogène soit fréquemment utilisé.

1038. Chaleur dégagée quand on déforme un corps. — Quand on déforme les corps ductiles, on développe de la chaleur, et en quantité indéfinie, comme dans le frottement. Par exemple, les corps deviennent brûlants quand ils subissent l'opération de la filière ou celle du laminoir. Quand une barre métallique est soumise à une charge capable de la rompre, on aperçoit un étranglement à l'endroit où doit se faire la rupture, et le métal devient brûlant en ce

point. Si l'on plie plusieurs fois de suite en sens contraires une barre flexible, elle s'échauffe fortement. La chaleur peut même se dégager quand la flexion ne dépasse pas la limite d'élasticité. En effet, M. Le Roux ayant serré une lame de bois dans un étau, et l'ayant fait vibrer au moyen d'une roue dont les dents l'attaquaient à son extrémité libre, la vit devenir brûlante au point où elle était serrée dans l'étau.

Chaleur dégagée par la percussion. — C'est surtout par la percussion que l'on peut déformer facilement les corps. Si l'on vient à frapper deux coups de marteau sur un clou posé sur une enclume, de manière à l'aplatir successivement dans deux sens opposés, il devient assez chaud pour enflammer de l'amadou. Les forgerons procèdent quelquefois ainsi pour allumer du feu. En battant à coups redoublés une baguette de fer ou d'acier, on parvient à la faire rougir. Une barre de plomb soumise à la même épreuve finit par fondre, et s'éparpille en gouttelettes sous le marteau.

Ces effets sont dus évidemment, en grande partie, au frottement énergique qui se produit entre les molécules, qui sont violemment déplacées les unes par rapport aux autres. Nous allons voir qu'une autre partie de ces effets est due à l'écrouissage, pour les métaux qui augmentent de densité par les diverses opérations mécaniques. Avec le plomb, qui n'est pas dans ce cas, toute la chaleur dégagée est due au déplacement des molécules.

1039. Chaleur dégagée par la compression. — La compression dégage de la chaleur, mais en quantité limitée comme ses effets. On peut dire, en général, que toutes les fois qu'on augmente la densité d'un corps, on dégage de la chaleur ; tandis que si l'on diminue la densité, on produit du froid. Berthollet, Pictet et Biot, ayant comprimé brusquement, sous un balancier à frapper les monnaies, des flans d'or, d'argent ou de cuivre, disposés de manière à ne pouvoir s'étendre latéralement, obtinrent un échauffement prononcé. Pour évaluer l'élévation de température, qui fût la plus prononcée pour le cuivre, et la plus faible pour l'or, ils jetaient promptement dans l'eau le disque frappé, et appliquaient la méthode des mélanges (892). Ce qu'il y a de remarquable, c'est que l'échauffement était d'autant plus faible que le disque avait reçu d'avance un plus grand nombre de coups de balancier. Ainsi, dans une expérience, un disque de cuivre s'échauffa de 11°,5 au premier choc, de 2°,5 au second, et de 0°,8 seulement au troisième, après lequel il n'y eut plus d'élévation de température. Les trois premiers chocs avaient écroui le disque et augmenté sa densité, tandis que la compression produite par les suivants n'était plus permanente, mais était suivie d'un retour au volume primitif, dû à l'élasticité, qui devait absorber la chaleur dégagée au premier moment par la compression. L'échauffement total des disques s'est toujours trouvé proportionnel à l'accroissement de leur densité.

[1] *Mémoires de la Société d'Arcueil*, t. II, p. 440.

Compression des liquides. — La compressibilité des liquides étant très faible, et leur capacité calorifique très grande, on ne pouvait guère espérer de pouvoir constater une élévation de température pendant leur compression. Cependant MM. Colladon et Sturm ont obtenu des effets sensibles sur certains liquides[1]. Un ballon en verre *bb'* (*fig.* 771), dont les parois avaient de 25 à 35mm d'épaisseur, contenait un thermomètre de Breguet *t*. Le liquide remplissant le ballon *bb'* était fortement comprimé par un piston que l'on poussait dans le corps de pompe P, soit lentement au moyen d'un levier *l* faisant tourner un petit treuil, soit rapidement en frappant avec un marteau sur l'extrémité de la tige. La pression fut portée par ces divers moyens, à 30 atmosphères. Quand le ballon *bb'* était rempli d'eau, l'aiguille du thermomètre éprouvait une déviation *négative*, comme s'il y avait eu abaissement de température; mais ce résultat était dû à l'inégale compression des deux métaux qui formaient l'hélice, le plus dilatable étant aussi le plus compressible (852). Avec l'alcool, la déviation fut moins prononcée, ce qui semble indiquer un effet calorifique. Les coups de marteau paraissaient même produire une légère déviation positive. Enfin, avec l'éther sulfurique, le plus compressible des liquides, les chocs du marteau ont fait dévier l'aiguille de manière à indiquer une élévation de température de 4° à 6°.



Fig. 771.


Fig. 772.

D'autres expériences, qui ont conduit aux mêmes résultats, ont été faites en comprimant le liquide au moyen d'air comprimé à 40 atmosphères dans un ballon adapté au vase *bb'*. En ouvrant un robinet, cette pression se faisait sentir brusquement sur le liquide.

La chaleur dégagée dans la compression d'un corps semble provenir du passage à l'état sensible d'une partie de la chaleur latente qu'il contient. C'est ce que confirment les expériences faites au moyen des gaz, dont la grande compressibilité rend les résultats beaucoup plus sensibles.

1040. Chaleur produite par la compression des gaz. — Nous avons eu plusieurs fois l'occasion de signaler le développement de la chaleur dans la compression des gaz. Quand la compression est forte, la température peut être

[1] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. XXXVI, p. 225.

portée jusqu'au rouge. Mollet, professeur à Lyon, a reconnu que l'amadou prend feu dans le conduit rétréci qui termine ordinairement les pompes à comprimer les gaz.

Briquet à air. — Le *briquet à air*, ou *briquet pneumatique* (*fig.* 772), consiste en un tube en métal ou en verre, fermé à l'une de ses extrémités, et contenant un piston. Quand on enfonce brusquement ce piston, la chaleur développée est assez élevée pour enflammer de l'amadou. Il faut retirer aussitôt l'amadou du tube, sans quoi il s'éteindrait. Autrefois on le plaçait au fond du tube, qui pouvait se dévisser rapidement, ou dans une cavité pratiquée dans le corps d'un robinet que l'on faisait tourner de manière à amener l'amadou au dehors. Aujourd'hui, on préfère fixer la matière inflammable dans une cavité ménagée à l'extrémité du piston, qu'on retire rapidement après l'avoir enfoncé. Pour qu'il y ait inflammation, il faut que l'air soit réduit au douzième de son volume, ce qui répond à une élévation de température de 490° ; cependant il suffit de 300° pour enflammer l'amadou. C'est qu'il y a beaucoup de chaleur enlevée par l'instrument, dont la masse est énorme par rapport à celle de l'air.

Quand on opère dans l'obscurité et que le tube est rempli d'oxygène, d'air ou de chlore, on aperçoit une vive lumière au moment où l'on enfonce brusquement le piston. On a cru d'abord que ces gaz avaient la propriété de devenir lumineux par la compression ; mais Thénard a montré que la lueur produite est due à la combustion de la matière grasse qui recouvre les parois du tube, ou qui se trouve en suspension dans le gaz. Quand le piston n'est pas graissé, et qu'on a soin d'éviter la présence de toute matière combustible, la lumière ne se produit plus.

1041. Froid dû à l'expansion des gaz. — La compression échauffant les gaz, on est porté à penser que leur expansion doit être accompagnée d'un refroidissement dû au passage à l'état latent d'une partie de la chaleur sensible; c'est, en effet, ce qui a lieu. Pour le prouver, on place un thermomètre de Breguet sous le récipient de la machine pneumatique ; pendant qu'on raréfie l'air, on voit l'aiguille marcher du côté du froid. Elle revient ensuite à sa position d'équilibre, quand on abandonne l'appareil à lui-même, l'équilibre de température avec les corps environnants se rétablissant. Si alors on laisse rentrer l'air sous le récipient, le mouvement de l'aiguille indique qu'il y a échauffement, l'air introduit le premier étant comprimé par celui qui entre ensuite.

Le froid produit par l'expansion des gaz explique les résultats suivants, observés par M. Triger : s'étant enfermé dans une chambre destinée à soumettre les malades à l'influence de l'air comprimé, et la pression étant d'une atmosphère et demie environ, il entendit une détonation violente, il se sentit saisi d'un froid glacial, et se trouva plongé dans une obscurité profonde. Une glace, servant à donner du jour dans la chambre, s'était brisée, et l'expansion du gaz avait occasionné le froid observé, et avait produit l'obscurité en condensant, sous forme d'épais brouillard, l'humidité que contenait la chambre.

Dans le sas qui servait à la fondation des piles du pont du Rhin (I, 344), on observait des phénomènes semblables, quand on laissait sortir l'air comprimé.

1042. Froid dans un jet de gaz. — Dans l'expérience de Gay-Lussac, le thermomètre du ballon qui reçoit le gaz commence par baisser; ce n'est qu'un instant après qu'il monte. C'est que le gaz, en entrant dans le ballon vide, se dilate subitement; d'où résulte le refroidissement observé d'abord. L'air introduit est ensuite comprimé par celui qui entre après lui, et il se dégage de la chaleur. Pour mettre ces résultats en évidence, on laisse rentrer de l'air par un orifice *a* (*fig.* 773), dans un récipient vide sous lequel sont des thermomètres *a*, *b*, *c*. Le plus rapproché de l'orifice ne varie pas, le suivant, *b*, descend, et le plus éloigné, *c*, monte pendant que le second baisse encore. En *a*, le gaz ne s'est pas encore dilaté et possède la température extérieure, en *b* il est très dilaté, et en *c* les premières portions introduites sont comprimées par celles qui entrent ensuite.



Fig. 773.

Quand on laisse échapper par un petit orifice, de l'air humide comprimé à 3 ou 4 atmosphères, le refroidissement du jet de gaz est tel qu'il dépose sur une boule de verre un petit amas de glace provenant de la vapeur d'eau congelée. Le même phénomène se produit avec les jets de gaz comprimé et humide qui s'échappent par des fissures, d'excavations que l'on rencontre dans certaines mines de houille. — C'est par le froid produit par son expansion que l'acide carbonique se solidifie en sortant d'un récipient où il est comprimé à 40 ou 50 atmosphères (965).


Fig. 774.

Quand la vapeur sort d'une chaudière à haute pression, elle se condense en formant un brouillard épais, et elle se refroidit tellement qu'en y plongeant la main, on éprouve une impression de fraîcheur. L'expérience se fait facilement avec une marmite de Papin (*fig.* 774). Si la pression de la vapeur ne dépassait pas celle de l'atmosphère, elle sortirait à la température de 100°, et l'on ne pourrait impunément y plonger la main.

1043. Comparaison entre les effets de la dilatation et de la compression. — *L'élévation de température produite par une certaine augmentation de pression est égale à l'abaissement produit par une diminution de pression égale.* Gay-Lussac a découvert cette loi, au moyen de l'appareil (*fig.* 775) : deux ballons de même capacité sont réunis par un tube adapté

à des robinets que portent des tubulures latérales. Deux autres tubulures laissent passer les tiges de thermomètres à air t, t, et portent un robinet par lequel on peut faire le vide ou introduire des gaz dans les ballons. L'un de ces ballons étant vide et l'autre plein de gaz, on ouvre les robinets de communication. Le thermomètre renfermé dans le ballon plein de gaz, baisse aussitôt; tandis que celui que renferme le ballon vide monte. Quand l'expérience est faite avec soin, les déplacements des index sont de même étendue sur les deux thermomètres; ce qui indique que l'élévation de température dans l'un des ballons est égale à l'abaissement dans l'autre.

Pour montrer l'égalité entre l'échauffement et le refroidissement, M. Joule plongea dans l'eau deux récipients en cuivre, dont l'un était vide et l'autre rempli d'air comprimé à 22 atmosphères. Ayant fait communiquer entre eux ces deux récipients, la pression devint égale à 11 atmosphères dans chacun d'eux, et cependant l'eau dans laquelle ils étaient plongés n'éprouva aucun changement de température. Il y eut donc compensation entre l'échauffement produit dans un des ballons et le refroidissement produit dans l'autre.

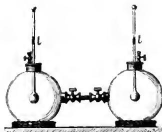


Fig. 775.

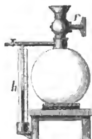


Fig. 776.

1044. Evaluation de la chaleur produite par la compression. — Pour évaluer l'élévation de température produite par une compression connue d'un gaz, Clément et Désormes ont employé un ballon (*fig.* 776) de 28 litres de capacité, muni d'un robinet à large ouverture r, et communiquant avec un tube vertical h plongeant dans l'eau, et destiné, avec le baromètre, à indiquer la pression dans le ballon. On commence par raréfier un peu l'air du ballon au moyen de la machine pneumatique; soit p' sa pression. On ouvre le robinet r, l'air extérieur se précipite dans le ballon en comprimant l'air qu'il contient, l'échauffe, et le liquide descend dans le tube h au niveau extérieur presque instantanément, à cause de la grandeur d'ouverture du robinet r. Aussitôt, on ferme ce robinet; le niveau remonte, parce que le gaz se refroidit, et la pression devient p'', plus grande que p', à cause de l'air qui s'est introduit.

Pour calculer l'élévation de température x produite par l'entrée de l'air, désignons par p la pression, et par t la température de l'air extérieur, et négligeons les variations de volume dues au déplacement du niveau h. La masse

de gaz qui possédait la température $t+x$ avait une force élastique égale à p. Cette force élastique devient égale à p'', sans changement de volume, quand la température redevient t. On a donc, en désignant par α le coefficient de dilatation de l'air,

$$\frac{p}{p''} = \frac{1+\alpha(t+x)}{1+\alpha t}, \qquad \text{d'où} \qquad x = \frac{p-p''}{p''}\,\frac{1+\alpha t}{\alpha}.$$

L'air du ballon qui occupait le volume v' sous la pression p' a été comprimé par l'air introduit, de manière que son volume est devenu v'', sous la pression p'' et à la même température. On a donc, d'après la loi de Mariotte,

$$v'' : v' = p' : p'', \qquad \text{d'où} \qquad \frac{v'-v''}{v'} = \frac{p''-p'}{p''}.$$

Le premier membre représente la diminution de l'unité de volume; on voit qu'elle est donnée en fonction des quantités observées p' et p''.

On peut conclure de là l'élévation de température y produite par une condensation différente k; car on a approximativement $\frac{p''-p'}{p''} : x = k : y$. Si l'on veut l'élévation de température correspondante à une compression de $\frac{1}{273}$ du volume à 0°, ou de $\frac{1}{273+t}$ du volume à $t°$, il faudra remplacer k par cette quantité, et x par sa valeur. On trouve ainsi $y = \frac{p-p''}{p''-p'} = 0°,340$.

Dans cette manière de procéder, il y a plusieurs causes d'erreur : une partie de la chaleur dégagée est enlevée immédiatement par les parois du ballon, quelque rapide que soit la rentrée de l'air; cet air, étant puisé dans l'atmosphère, est humide; la chaleur dégagée par l'observateur modifie aussi les résultats. Gay-Lussac et Welter ont évité en partie ces inconvénients en renversant la marche de l'opération; au lieu de diminuer la pression dans le ballon et d'y laisser ensuite rentrer l'air, ils donnaient d'abord au gaz sec contenu dans le ballon une pression $p' = p + h'$, supérieure à celle, p, de l'atmosphère, et ouvraient ensuite le robinet jusqu'à ce que la pression fût redevenue égale à p, par suite de la sortie d'un peu de gaz et du refroidissement qui accompagne son expansion. Le robinet étant aussitôt fermé, la température reprenait sa première valeur, et la pression augmentait et devenait $p'' = p + h''$. Alors on avait, pour la variation de température x,

$$x = \frac{p-p''}{p''}\,\frac{1+\alpha t}{\alpha} = -\frac{h''}{p+h''}\,\frac{1+\alpha t}{\alpha}.$$

M. Masson a fait un grand nombre d'expériences, par cette méthode, sur l'air et divers autres gaz. Le ballon, à large ouverture, contenait 39 litres. La pression était donnée par la différence de niveau, mesurée au cathétomètre, d'une colonne d'acide sulfurique concentré, renfermée dans un tube en U dont une extrémité communiquait avec l'intérieur du ballon et l'autre avec l'atmosphère. Le ballon était plongé dans une grande masse d'eau, dont la température ne variait pas pendant plusieurs heures. Comme il fallait plus d'une heure pour que la température du gaz redevînt égale à celle du bain, après la sortie du gaz, il était nécessaire de vérifier si la pression atmosphérique n'avait pas varié depuis le commencement de l'expérience. S'il en était ainsi, il suffisait de remplacer $p'' = p + h''$ par $p + h'' \pm \pi$, π étant le changement de pression.

M. Masson a trouvé ainsi pour l'*air*, l'*hydrogène* et l'*acide carbonique*, des nombres qui diffèrent peu de ceux que Dulong a trouvés par une méthode indirecte fondée sur les propriétés des tuyaux sonores et que nous avons exposée plus haut (I, 582).



Fig. 777.

1045. Cas de grands changements de volume. Les expériences qui précèdent n'ont été faites que sur des compressions et des dilatations peu prononcées. MM. Fabre et Silbermann ont opéré dans des limites plus étendues au moyen de l'appareil (*fig.* 777). Cet appareil consiste en un corps de pompe en cuivre, garni à sa partie inférieure d'un manchon en verre, à travers lequel on distingue un thermomètre de Breguet. Un piston P, mis en mouvement par un levier muni d'un parallélogramme de Watt, sert à faire varier brusquement le volume du gaz qui remplit le corps de pompe. La course du piston est limitée par des chevilles qui arrêtent le levier dans ses mouvements. Les gaz sont introduits au moyen du tube à robinet r et du tube t, au-dessus duquel on soulève le piston. Si l'on enfonce ou si l'on retire brusquement ce piston, le thermomètre de Breguet indique une élévation ou un abaissement de température.

Voici le tableau des variations obtenues. Le signe (—) correspond à la dilatation du gaz (D), et le signe (+) à la compression (C). Les nombres inscrits dans la quatrième colonne de chiffres ont été obtenus en ajoutant les résultats contenus dans la seconde et la troisième; et ceux de la cinquième colonne, en ajoutant les résultats des trois premières. Des expériences de vérification ont prouvé que les températures ainsi calculées sont d'accord avec celles que l'on obtiendrait directement.

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XXXVII, p. 474.

GAZ.		Entre 1/4 atmosph. et 1/2.	Entre 1/2 at. et 1.	Entre 1 atm. et 2.	Entre 1/2 at. et 2.	Entre 1/4 at. et 2.	VARIATION DE TEMPÉR. pour $\frac{1}{273}$, entre 1/4 et 1/2 at.	1/2 et 1 atm	1 et 2 atm.
II. Air	C	+5°,6	8°,8	13°,2	22°,0	27°,6	0,0204	0,0321	0,0482
	D	−5,0	7,6	12,8	20,4	25,4	»	»	»
III. Oxygène	C	+5,6	9,3	13,2	22,5	28,1	0,0204	0,0339	0,0482
	D	−4,7	7,6	13,2	20,8	25,5	»	»	»
I. Hydrogène	C	+9,7	13,8	18,5	32,3	42,0	0,0354	0,0504	0,0675
	D	−5,0	8,5	13,7	22,2	27,2	»	»	»
VI. Acide carbonique	C	+4,7	7,3	11,3	18,6	23,3	0,0171	0,0267	0,0412
	D	−4,7	7,3	11,3	18,6	23,3	»	»	»
IV. Oxyde de carbone	C	+5,6	8,6	12,6	21,2	26,8	0,0204	0,0314	0,0460
	D	−5,0	7,3	12,6	19,9	24,8	»	»	»
V. Protoxyde d'azote	C	+4,7	6,6	11,0	17,6	22,3	0,0171	0,0241	0,0401
	D	−4,8	6,6	11,3	17,9	22,7	»	»	»

L'abaissement de température que produit la dilatation d'un gaz semble généralement moindre que l'élévation produite par la compression ; mais il faut remarquer qu'une partie de la chaleur dégagée par la compression est enlevée par les parois du corps de pompe, et qu'une partie du résultat produit par la raréfaction est compensé par la chaleur cédée par ces parois. Or, ce dernier effet est plus prononcé que l'autre ; car le piston, en se retirant, abandonne au gaz une plus grande surface de contact avec les parois. Remarquons que la différence entre les deux effets n'est pas la même pour tous les gaz ; elle est la plus grande pour l'hydrogène. MM. Favre et Silbermann expliquent ce phénomène en remarquant que ce gaz conduit mieux la chaleur que les autres, comme nous l'avons déjà dit (823) ; et, en effet, ils ont vu le thermomètre de Breguet atteindre son maximum d'écart beaucoup plus promptement dans l'hydrogène que dans les autres gaz.

1046. Remarques. — Les expériences destinées à mesurer la chaleur dégagée par la compression des gaz ont été entreprises en vue de comparer les capacités calorifiques à pression constante et à volume constant. C'est après la publication des résultats trouvés par Clément et Désormes, que l'on a cherché à expliquer la différence que l'on trouvait entre la vitesse du son dans l'air donnée par l'expérience, et cette vitesse calculée au moyen de la formule de Newton. C'est aussi pour comparer les deux capacités qu'on s'est attaché à évaluer la quantité de chaleur dégagée par une réduction de volume égale à la dilatation pour 1°, et l'on admettait qu'elle était égale à la quantité de chaleur

absorbée pour dilater le gaz de $\frac{1}{273}$. Nous verrons (1076) qu'il n'en est pas ainsi, et qu'il n'y a qu'une différence à peine sensible entre les capacités à volume constant et à volume variable.

Dulong avait conclu de ses expériences, qu'une même compression produisait une même élévation de température chez les gaz simples qui ont même capacité calorifique. Il admettait qu'il en devait être de même pour les gaz composés, et que les différences observées provenaient des différences entre leurs capacités ; et il énonçait les lois suivantes : 1° des volumes égaux de tous les gaz pris à la même pression et à la même température, dégagent ou absorbent la même quantité de chaleur, quand ils sont comprimés ou dilatés d'une même fraction de leur volume ; 2° les variations de température qui en résultent sont en raison inverse de leur chaleur spécifique à volume constant. — Mais il résulte du tableau précédent que, pour un même gaz, une même réduction de volume produit une élévation de température différente suivant la pression d'où l'on part. La seconde loi paraît donc difficile à accepter, à moins qu'on n'admette que la capacité d'un même gaz diminue notablement avec la pression.

1047. Chaleur produite dans la condensation des gaz par les solides. — Nous avons vu (I, 383) que les gaz se condensent à la surface des corps solides. Cette condensation est accompagnée, au moment où elle se produit, d'un dégagement de chaleur, qui devient surtout marqué quand l'étendue de la surface absorbante est très grande par rapport à la masse du corps, comme cela a lieu dans les corps spongieux. Nous avons décrit (I, 384) le briquet à gaz hydrogène, dans lequel un jet de gaz s'enflamme après avoir rendu incandescent un fragment d'éponge de platine. Les poudres métalliques impalpables, comme le *noir de platine*, peuvent faire détoner en s'échauffant, un mélange explosif dans lequel on les projette.

Chaleur de capillarité. — M. Pouillet a constaté par des expériences nombreuses[1], qu'il y a de la chaleur dégagée au moment où un liquide mouille un corps solide. Pour rendre sensible cet effet, qui est peu prononcé, il faut réduire le corps en poudre fine et y plonger un petit thermomètre très sensible. Ce thermomètre monte pendant deux à quatre minutes, puis redescend lentement jusqu'à la température ambiante. M. Pouillet a opéré sur le fer, le bismuth, l'antimoine... ; les oxydes insolubles, comme la silice, l'alumine, la magnésie ; les oxydes de zinc, de fer, d'étain, etc. ; le verre, la brique, la porcelaine, l'argile. Les liquides employés étaient l'eau, l'huile, l'alcool, l'éther acétique et l'essence de térébenthine. Les variations de température ne sont que de 0°,2 à 0°,5, et semblent indépendantes de la nature des corps mis en présence.

Il y a encore dégagement de chaleur quand un corps solide d'origine organique absorbe un liquide. Dans les expériences de M. Pouillet, l'élévation de

[1] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. XX, p. 141.

température a été de 2° à 10°, suivant les substances. Ce résultat ne peut être attribué à une action chimique, car l'eau, l'alcool et l'éther acétique produisent sensiblement le même effet, quand ils sont absorbés par le même corps. Parmi les substances essayées, nous citerons : le charbon ; l'amidon ; du bois, des écorces, des racines diverses ; des graines réduites en farine ou simplement écrasées ; la soie, la laine, l'éponge, les cheveux ; la baleine, l'ivoire, la corne ; les peaux, diverses membranes.

L'action calorifique s'arrête, dès que le corps est mouillé ou imbibé. On peut l'attribuer à une condensation du liquide près de la surface solide qu'il mouille ; mais il peut se faire aussi qu'une partie de l'effet soit dû au frottement des molécules liquides sur celles du solide, pendant que les premières se meuvent pour prendre leur position d'équilibre.

II. Chaleur dégagée dans les combinaisons chimiques.

1048. Toutes les fois que deux corps se combinent, il y a dégagement de chaleur, à moins que, comme dans les mélanges réfrigérants, il n'y ait de la chaleur qui disparaisse à l'état latent pour produire la liquéfaction de quelques-unes des substances mises en présence. Par exemple, quand on mêle de l'acide sulfurique et de l'eau, ces deux liquides se combinent et deviennent brûlants. De l'eau versée sur la baryte se combine avec elle, et si l'on opère avec précaution, on rend la masse incandescente. Tout le monde sait que l'eau versée sur la chaux vive dégage beaucoup de chaleur; la température s'élève assez pour enflammer de la poudre contenue dans un tube qu'on enfonce dans la masse échauffée. On peut, en versant de l'eau peu à peu, enflammer de menus copeaux ; souvent les chaufourniers procèdent ainsi pour allumer leurs fours. — Si l'on mélange dans une fiole de verre, de la limaille de cuivre et du soufre en poudre, il n'y a pas d'action chimique à la température ordinaire ; mais si l'on fait chauffer le mélange, le soufre fond, et tout à coup la masse devient incandescente par la chaleur qui se dégage pendant que la combinaison s'effectue. Nous citerons enfin toutes les combustions.

1049. COMBUSTION. — On nomme *combustion* la combinaison d'un corps ou de ses éléments avec l'oxygène, quand cette combinaison est accompagnée d'un dégagement de chaleur allant jusqu'à l'incandescence, c'est-à-dire accompagné de lumière. Pour qu'une combustion se fasse dans l'oxygène ou dans l'air, il faut généralement *allumer* le corps qui doit *brûler* ; ce qui se fait en portant un de ses points à une haute température. Sous l'influence de cette température, la combinaison commence ; la chaleur qu'elle dégage se communique aux parties voisines, qui peuvent alors se combiner à leur tour avec l'oxygène, et ainsi de suite de proche en proche. C'est ainsi que le charbon, le

bois, les corps gras des bougies ou des lampes, continuent à brûler quand on les a *allumés*.

C'est par la combustion qu'on se procure ordinairement la chaleur, dans l'industrie et dans les usages domestiques. Ce phénomène, qui se reproduit chaque jour dans nos foyers, a été longtemps enveloppé d'une grande obscurité; il en est peu qui soient restés aussi longtemps inexplicables. Les alchimistes attribuaient la combustion à une substance particulière qu'ils appelaient le *feu*, et qui avait la faculté de dévorer certains corps et de les transformer en sa propre substance. En 1630, Jean Rey, médecin français, découvrit que le plomb et l'étain augmentent de poids pendant qu'on les calcine, et il eut l'idée heureuse d'attribuer ce résultat à une absorption d'air. Robert Hooke, en 1665, considérait la combustion comme la dissolution des corps par une matière contenue dans l'air, et analogue à celle qui se dégage du salpêtre quand on le calcine; il ne lui manquait, pour compléter son explication, que de connaître cette substance qui n'est autre chose que l'oxygène. Adoptée dix ans plus tard par Mayow, cette théorie, qui touchait de si près à la vérité, fut ensuite complètement abandonnée pour le système du *phlogistique*, proposé vers 1700, par Becher, et développé d'une manière si brillante par son disciple Stahl. Dans ce système, on admettait que les corps combustibles étaient combinés avec une substance particulière nommée *phlogistique*. La combustion consistait dans la séparation de cette substance, et le corps n'était plus propre à la combustion. En se dégageant, le phlogistique était dans un état particulier d'agitation qui occasionnait la chaleur et la lumière, qui n'étaient ainsi que des manifestations du phlogistique. Newton ayant fait admettre plus tard que la lumière était une substance particulière, Macquer pensa que le phlogistique n'était autre chose que cette substance fixée dans les corps. La chaleur n'était plus alors qu'une propriété de la lumière. Cette manière de voir ne pouvait se concilier avec la découverte de la chaleur latente, qui existe aussi dans les corps non combustibles, comme l'eau. Les chimistes supposèrent alors que le *phlogistique* n'était autre que l'*éther* (683), et l'augmentation de poids que les corps éprouvent en brûlant s'expliquait en admettant que l'éther avait une pesanteur négative.

Priestley, ayant reconnu que l'air qui a servi à la combustion n'est plus propre à la produire, admit que le phlogistique, quand il se dégage d'un corps qui brûle, se combine avec l'air; et Crawfort ajouta que, pendant cette combinaison, la chaleur et la lumière unies à l'air étaient chassées de ce fluide. Kirwan voulut prouver que le phlogistique n'était autre chose que l'hydrogène, contenu dans tous les corps combustibles, et s'en dégageant pendant la combustion pour se combiner avec l'oxygène de l'air. Enfin, Lavoisier prouva que la combustion consiste dans la combinaison du corps qui brûle avec l'oxygène. Il montra que, si l'on opère en vase clos, l'oxygène de l'air disparaît, et que le poids du vase ne change pas. Lorsque le vase est rempli d'oxygène pur, et que le composé formé est solide, il se fait un vide à la place du gaz. C'est ce

qui a lieu quand on brûle du phosphore dans un ballon fermé rempli d'oxygène; si l'on ouvre le ballon sous l'eau, ce liquide se précipite et le remplit entièrement. L'oxygène a donc disparu en se combinant avec le phosphore.

Pour mettre en évidence le rôle de l'oxygène de l'air dans la combustion, on fait souvent les expériences suivantes : on place une bougie allumée sous une cloche remplie d'air reposant sur le mercure ; au bout de peu d'instants, la flamme pâlit, puis elle s'éteint quand presque tout l'oxygène a été absorbé dans la combustion. Des charbons ardents s'éteignent de même au bout de quelque temps. Si l'on fait le vide sous la cloche, la bougie ou les charbons ardents s'éteignent aussitôt. Quand un corps brûle dans l'atmosphère, l'air se renouvelle autour de ce corps, à cause de l'ascension des produits gazeux de la combustion, ou de l'air échauffé par le contact du corps. Si l'on produit un courant d'air par un tirage, comme dans les cheminées, ou en projetant de ce gaz sur le combustible au moyen d'un soufflet, la combustion, comme chacun le sait, se fait avec beaucoup plus d'activité.

Dans l'oxygène pur, la combustion est beaucoup plus vive que dans l'air, qui contient 0,79 d'azote. Aussi, du charbon, du phosphore, du soufre allumés et portés dans un flacon plein d'oxygène, brûlent-ils avec une vivacité extrême. Une lame d'acier, roulée en hélice pour qu'elle occupe moins de place, et plongée dans l'oxygène, après qu'on en a fait rougir l'extrémité, brûle avec un grand éclat en lançant de tous côtés des parcelles d'oxyde de fer. La chaleur dégagée est telle que les gouttes d'oxyde peuvent s'incruster dans le fond du vase de verre, après avoir traversé une couche d'eau de plusieurs centimètres.

1050. De l'origine de la chaleur dégagée. — Nous ne savons pas au juste d'où vient la chaleur dégagée dans les combinaisons chimiques. Dans le système des ondulations, on entrevoit seulement que l'agitation des molécules, pendant qu'elles se précipitent les unes vers les autres pour s'associer dans une combinaison, peut imprimer à l'éther le mouvement vibratoire qui constitue la chaleur. Lavoisier attribuait la chaleur dégagée, au passage à l'état sensible de la chaleur latente abandonnée par l'oxygène en se condensant pour former une combinaison solide. Mais il y a des combinaisons qui sont gazeuzes; l'explication de Lavoisier n'est donc pas satisfaisante, et c'est là ce qui a d'abord empêché d'adopter ses idées sur la combustion. Ce n'est qu'en 1785, après l'adhésion de Berthollet, suivie bientôt de celle de Fourcroy et de Morveau, que la chimie antiphlogistique commença à prévaloir. Crawfort expliquait la chaleur dégagée dans les combinaisons en admettant que la capacité calorifique du composé était plus grande que la moyenne des capacités des substances combinées ; mais on a reconnu que le contraire a souvent lieu, auquel cas il aurait dû se produire du froid.

Nous verrons plus tard que les actions chimiques sont accompagnées d'un dégagement *d'électricité*, et comme l'électricité est une cause de chaleur, on est porté à penser que c'est à sa présence qu'est due la chaleur produite dans

les actions chimiques. Nous reviendrons sur ce sujet en étudiant les effets des courants électriques.

1051. DE LA FLAMME. — La flamme n'est autre chose qu'un gaz devenu lumineux sous l'influence d'une température très élevée, produite le plus souvent par sa combinaison avec l'oxygène. Au-delà de l'espace dans lequel a lieu cette combinaison, le gaz n'est plus lumineux, c'est pourquoi la flamme est limitée ; elle est mobile comme le gaz lui-même. On voit que tout corps qui brûle avec flamme doit laisser dégager un gaz, sous l'influence de la chaleur qui sert à l'allumer, puis de celle qui se produit pendant la combustion. Par exemple, quand on allume une bougie, la chaleur communiquée à la mèche décompose la matière végétale dont elle est formée, cette décomposition donne lieu à un dégagement de gaz combustible, qui se combine avec l'oxygène de l'air et forme une flamme. La chaleur dégagée dans cette combustion fait fondre le corps gras, qui monte dans la mèche par capillarité. Là, il est décomposé par la chaleur, en donnant naissance à un gaz qui brûle à son tour et produit la chaleur nécessaire pour fondre et décomposer une nouvelle portion du corps gras, et ainsi de suite.

Pour prouver que tous les corps qui brûlent avec flamme produisent des gaz combustibles en se décomposant par la chaleur, on met de l'huile, de la cire, etc., dans une fiole de verre, on la porte sur le feu, le corps gras fond, puis il présente une apparence d'ébullition, en dégageant un gaz, qu'on laisse sortir par un tube effilé, à l'extrémité duquel on l'enflamme. On peut aussi recueillir ce gaz dans une éprouvette sur l'eau, au moyen d'un tube de dégagement, et l'enflammer ensuite à l'ouverture de l'éprouvette. Le gaz ainsi produit est un mélange de divers gaz, parmi lesquels domine l'hydrogène bi-carboné, ou *gaz oléfiant*, composé de carbone et d'hydrogène. Le bois, la houille, calcinés dans des vases de fer ou de grès, donnent des résultats analogues à ceux des corps gras.

C'est en décomposant, par l'action du feu, la houille ou diverses substances organiques, que l'on se procure le gaz qui sert à l'éclairage. Après avoir été purifié, il est recueilli dans un vaste gazomètre (I, 370), d'où il se rend, par des tuyaux souterrains, aux becs où il doit être enflammé. L'ingénieur français Philippe Lebon, qui a imaginé en 1785 l'éclairage au gaz, l'obtenait par la distillation du bois. Cette invention n'eut pas d'abord de succès, et ce ne fut qu'en 1810, à Londres, que fut réalisé pour la première fois l'éclairage public par le gaz.

Si l'on souffle brusquement la flamme d'une bougie, on disperse le gaz inflammable dans une grande masse d'air, ce qui le refroidit assez pour que la combustion cesse. Cependant la mèche fournit encore du gaz, qui s'élève sous forme d'une petite colonne de fumée. Si l'on vient à allumer la partie supérieure de cette colonne, on voit la flamme se propager en descendant jusqu'à la mèche, qui se rallume. Cette petite expérience, citée par Lucrèce, prouve qu'il se dégage un gaz inflammable de la mèche, tant qu'elle reste très chaude.

1052. Mélanges explosifs. — Quand un gaz combustible est mélangé avec de l'oxygéne en proportions convenables, et qu'on approche une bougie allumée de l'ouverture du vase qui contient le mélange, l'inflammation se propage dans toute la masse avec une rapidité extrême, et il se produit une violente détonation due à l'expansion des produits gazeux de la combustion, dont la température est extrêmement élevée. On a quelquefois à déplorer de graves accidents causés par la formation de semblables mélanges dans les lieux renfermés éclairés par le gaz, lorsque les tuyaux présentent quelque fuite. Partout où l'air circule difficilement, comme dans l'espace qui existe au-dessus des plafonds, il peut se former des mélanges dans des proportions convenables pour qu'il y ait explosion. Pour éviter ce danger, les tuyaux qui amènent le gaz aux becs sont laissés à découvert. S'il y a des fuites, le gaz se répand dans la chambre où l'air se renouvelle facilement.

Dans certaines mines de houille, il se dégage un gaz combustible, l'hydrogéne proto-carboné, qui, mélangé à l'air en certaines proportions, constitue un mélange explosif, auquel les lampes des mineurs peuvent mettre le feu. L'explosion est ici d'autant plus désastreuse qu'elle se produit sur une plus grande échelle : les mineurs sont brûlés, asphyxiés, et la commotion produit souvent des éboulements. Davy, consulté sur le moyen d'éviter ces accidents, qui se multipliaient en Angleterre d'une manière effrayante, entreprit une série d'expériences à la suite desquelles il trouva le moyen demandé.

1053. Propriétés des toiles métalliques. — Davy remarqua d'abord que l'inflammation d'un mélange formé de 8 parties d'air et 1 de gaz d'éclairage met plus d'une seconde à se propager à travers un tube de $0^{cm},63$ de diamétre, et de 30^{cm} de longueur. Dans un tube de $0^{cm},36$ de diamètre, l'inflammation ne se propage plus, pourvu qu'il soit beaucoup plus long que large. Wollaston et Tennant avaient déjà remarqué que les mélanges explosifs ne détonent pas dans des tubes étroits, et Davy constata que l'effet est bien plus marqué avec les tubes métalliques qu'avec les tubes de verre. A travers des tubes trés fins, ou de petits trous pratiqués dans une plaque de métal, l'inflammation ne peut se propager, même quand l'épaisseur est très petite. Enfin, une toile métallique contenant de 100 à 140 mailles par centimétre carré, intercepte complétement la flamme ; si l'on abaisse sur la flamme une semblable toile, on voit qu'elle ne passe pas au-delà. Cependant, du gaz inflammable traverse la toile, car on peut l'allumer au-dessus d'elle, et il continue ensuite à brûler. De la poudre, du fulmi-coton, ne peuvent être enflammés à travers une toile métallique, tant qu'elle n'est pas assez échauffée pour les enflammer par son contact. Un brin de paille ou d'herbe sèche traversant une toile métallique peut être brûlée d'un côté sans que la combustion se propage de l'autre. On fait des lanternes en toile métallique, principalement pour l'usage des habitations rurales, que l'on peut porter allumées, sans aucun danger, dans les endroits où l'on conserve le foin et la paille.

Davy expliquait les résultats qui précédent par le refroidissement que feraient

éprouver au gaz, les fils de métal bons conducteurs de la chaleur. Mais cette explication est insuffisante ; car lorsque la toile métallique, portée au rouge, ne peut refroidir que faiblement le gaz, elle continue à intercepter la flamme. De plus, J. Aldini a montré qu'une toile d'amiante produit les mêmes effets qu'une toile métallique, quoique l'amiante conduise très mal la chaleur.

Lampe de sûreté. — Une fois qu'il eut découvert les propriétés des toiles métalliques, Davy construisit une lampe pouvant être plongée impunément dans un mélange détonant. La flamme de cette lampe est entourée d'un cylindre en verre fermé à ses deux extrémités par des toiles métalliques. Quand on la plonge dans un mélange détonant, l'inflammation se produit en dedans, mais elle ne peut se propager au dehors. La *fig.* 778 représente le modèle de la *lampe de sûreté* le plus répandu. La flamme est ici entièrement entourée d'une toile métallique. L est le réservoir d'huile ; on le remplit par l'orifice latéral *o*. Cette lampe, à laquelle la reconnaissance des mineurs a donné le nom de *Davyne*, éclaire faiblement ; de plus, un courant d'air un peu vif peut pousser la flamme au dehors. C'est pourquoi divers inventeurs ont cherché à la perfectionner. M. Combes a imaginé l'appareil représenté (*fig.* 779), dans lequel il a réuni les divers perfectionnements déjà connus. Au-dessus du réservoir cylindrique qui contient l'huile, se trouve un anneau *aa*, soutenu à une certaine distance du réservoir par quatre petites colonnes. Une double toile métallique *cc*, au centre de laquelle passe la mèche de la lampe, s'appuie sur un rebord intérieur que porte cet anneau. Un dôme *oo*, percé en son milieu, dirige vers la mèche l'air qui a traversé la toile métallique *cc*. A l'anneau *aa* se visse une virole qui soutient un cylindre en verre *vv*, dont les parois ont près de 1 centimètre d'épaisseur, et dont la partie supérieure est entourée par un anneau soutenu par des tiges de fer *l*, *l*. A cet anneau se visse intérieurement une autre virole qui presse le cylindre *vv* et qui porte un chapeau en toile métallique *t*, par lequel s'échappent les produits de la combustion. Un tube T produit un tirage, qui retient la flamme dans l'axe de l'appareil. Enfin, la tige à double crochet *rr* permet d'arranger la mèche sans qu'il soit nécessaire de démonter la lampe ; cette tige passe dans un tube qui traverse l'huile du réservoir.



Fig. 778.

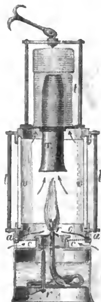


Fig 779.

1054. Propriétés du platine incandescent. — Quand une lampe de sûreté est plongée dans un mélange détonant, le plus souvent, l'explosion intérieure éteint la flamme. Le mineur, averti par cet accident, doit s'éloigner aussitôt d'une atmosphère peu respirable ; mais il lui est difficile de se conduire au milieu de l'obscurité. Davy a encore trouvé remède à cet inconvénient : il a découvert qu'un fil de platine plongé incandescent dans un gaz inflammable mêlé d'air, reste incandescent, en absorbant la chaleur dégagée par la combinaison chimique qui continue à s'effectuer au contact de sa surface. Pour vérifier ce résultat, on fixe un fil de platine roulé en hélice au-dessous d'un morceau de carton avec lequel on recouvre un vase plein d'éther, après avoir fait rougir le fil. On le voit rester incandescent au milieu de la vapeur d'éther mêlée d'air. On obtient un résultat semblable en fixant le fil de platine à un morceau de camphre qu'on enflamme pour faire rougir le fil, et qu'on éteint ensuite. Si l'on allume une lampe à alcool dont la mèche est enveloppée par une spirale en fil de platine, celle-ci reste incandescente après qu'on a éteint la lampe, ce qui constitue une *lampe sans flamme*. Le fer, l'argent et l'or produisent les mêmes effets que le platine, mais moins sûrement.



Fig. 780.

Après avoir constaté ces faits, Davy disposa dans la flamme de la lampe de sûreté, une hélice en fil de platine *a* (*fig.* 780), qui reste incandescente après que la lampe s'est éteinte, tant qu'elle est plongée dans l'atmosphère inflammable, et répand une lueur qui suffit pour que le mineur puisse se diriger dans les galeries.

1055. Appareil de J. Aldini. — Aldini a tiré parti des propriétés des toiles métalliques pour former une sorte de vêtement qui permet de traverser impunément les flammes d'un incendie, et même d'y séjourner pendant quelques instants. Ce vêtement est formé d'une toile métallique qui recouvre toutes les parties du corps, et en est séparée par une étoffe épaisse d'amiante ou simplement de laine. Un masque en gaze métallique recouvre le visage. Ce qu'il y a de remarquable, c'est que, au milieu des flammes, on n'est pas suffoqué. Pour expliquer ce résultat, on suppose que l'air se refroidit assez, en traversant la toile métallique, pour devenir respirable.

1056. Structure de la flamme. — Nous avons vu que le pouvoir émissif de la flamme est très petit quand elle ne contient pas de particules solides (757). Il en est de même du pouvoir d'émettre de la lumière : ce ne sont pas les flammes les plus chaudes qui ont le plus d'éclat, mais celles qui contiennent le plus de particules solides. C'est encore à Davy que nous devons les premières notions à cet égard [1].

On distingue, dans la flamme d'une bougie, trois couches concentriques. A l'extérieur se trouve une couche mince à peine visible *nn* (*fig.* 781), d'un

[1] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. III, p. 129.

jaune pâle vers le haut, et bleuâtre à la partie inférieure; on la distingue plus facilement dans la flamme de l'alcool, dont l'éclat général est assez faible. Après cette couche extérieure vient une couche brillante *c*. Enfin, dans l'intérieur, autour et au-dessus de l'extrémité de la mèche, se trouve un espace obscur, allongé vers le haut, *a*. Ces différentes parties se distinguent facilement à travers une toile métallique coupant la flamme horizontalement dans sa partie moyenne.

La structure de la flamme s'explique facilement : à l'extérieur, où l'air abonde, les deux éléments du gaz inflammable, carbone et hydrogène, sont complétement brûlés en formant de la vapeur d'eau et de l'acide carbonique. Là, la température est la plus élevée; l'angle d'un éclat de verre peut y fondre. Dans la couche moyenne, il ne pénètre plus que l'oxygène qui n'a pas été employé en traversant la couche extérieure. La petite quantité qui reste est absorbée par l'hydrogène du gaz, et le carbone mis en liberté apparaît sous forme d'une poussière fine rendue incandescente, soit par la chaleur de la couche extérieure, soit par la combustion qu'elle éprouve quand, en s'élevant avec les gaz chauds, elle arrive vers le haut de la flamme, où elle rencontre de l'air. Enfin, dans l'intérieur, il ne parvient pas d'oxygène, il n'y a pas de combustion, et l'espace obscur est rempli de gaz inflammable ou de vapeurs de la substance grasse, qui ne brûlent qu'en arrivant dans la partie supérieure de la flamme, à moins que l'air n'y arrive pas en assez grande quantité; alors la mèche fume et répand l'odeur particulière aux corps gras en vapeur. La température de ce noyau obscur est nécessairement peu élevée. M. J. Murray a pu y introduire de la poudre, dans une petite cuiller d'ivoire, sans qu'elle s'enflammât. Il a pu même y maintenir de l'argent fulminant, pendant quelques secondes. Il a vu enfin, le phosphore s'y éteindre.



Fig. 781.

M. Porret ayant placé verticalement dans la flamme un morceau de toile métallique dont le contour en présentait la forme, vit le bord de cette toile devenir incandescent, et reconnut qu'un dépôt assez épais de noir de fumée s'était formé dans la partie correspondante à la couche brillante de la flamme. Il disposa aussi un tube horizontal, de manière que l'une de ses extrémités, recourbée verticalement, plongeât dans l'espace obscur, et trouva dans l'intérieur de ce tube un dépôt de matières grasses provenant des vapeurs non décomposées.

Davy explique, par les principes qui précèdent, le vif éclat des flammes dans lesquelles il se produit une matière solide, comme lorsqu'on brûle du phosphore ou du zinc dans l'oxygène, du potassium dans le chlore. La combustion du gaz hydrogène, de l'oxyde de carbone, du soufre, n'engendre qu'une lumière

faible, parce que ces corps ne donnent en brûlant que des produits gazeux. On augmente singuliérement l'éclat de cette lumiére en projetant dans la flamme certaines poussiéres, comme de l'oxyde de zinc ou de l'amiante en poudre trés fine.

1057. HAUTES TEMPÉRATURES PAR LA COMBUSTION. — La température produite par la combustion dépend de plusieurs conditions : 1° de la nature de la substance qui brûle ; 2° de la quantité d'oxygéne fournie dans l'unité de temps ; 3° de la densité : une même substance produit en brûlant une température d'autant plus élevée qu'elle est plus dense. C'est ainsi que les charbons, les bois les plus denses donnent une température plus élevée que les charbons et les bois légers ; c'est que, avec les premiers, la même quantité de chaleur est concentrée dans un plus petit espace.

Influence de la quantité d'oxygène. — Plus on fournit d'oxygéne au combustible, plus la quantité de chaleur produite dans un temps donné est grande, et, par suite, la température élevée. Dans l'air comprimé, la combustion est bien plus activée qu'à l'air libre (I, 344), et l'on sait combien elle est vive dans l'oxygéne pur.

C'est en lançant de grandes quantités d'air au moyen de machines soufflantes trés puissantes, qu'on obtient dans les fonderies, la température nécessaire à la réduction et à la fusion des métaux. Quand l'air insufflé est d'avance porté à une haute température, la combustion se fait avec une activité qui dépasse toutes les prévisions. La chaleur spécifique des gaz est, en effet, tellement faible, que la quantité de chaleur qu'absorbe l'air froid est tout-à-fait insignifiante. Il faut donc voir dans ce phénoméne la surexcitation de l'action chimique, provenant de ce que les molécules de l'oxygéne étant échauffées, elles se combinent plus rapidement et avec plus d'énergie. Pour échauffer l'air, on le fait passer, à sa sortie de la machine soufflante, dans des tuyaux placés dans la cheminée qui reçoit la flamme du fourneau, d'où il se rend à la tuyére.

M. Sainte-Claire Deville est parvenu à obtenir, avec un feu de forge, des températures capables de fondre la silice et de volatiliser le platine[1]. Il emploie pour cela un charbon trés dense formé de ces parcelles de houille incomplétement brûlée, qui tombent à travers la grille des fourneaux. Ce combustible, en petits fragments, est placé dans un cylindre creux en terre cuite, fermé en dessous par une plaque de fonte percée de trous formant une circonférence de 10^{cm} de diamétre. On fait arriver par ces trous, le vent d'un soufflet de forge. Un creuset en chaux vive est placé au milieu des trous ; en quelques minutes, le platine y fond, et au bout de quelque temps on trouve des parcelles condensées sur le couvercle du creuset, ce qui prouve que le métal s'est volatilisé.

M. Deville a fondu la silice dans un creuset en graphite, au moyen du même appareil.

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XLVI, p. 190.

1058. Chalumeau. — La flamme produit une très haute température quand on y dirige un courant d'air, par exemple, avec le *chalumeau*, si souvent employé dans la minéralogie, et dans l'industrie pour souder les métaux précieux. Le chalumeau consiste en un tube *bro* (*fig.* 782), dans lequel on souffle avec la bouche par l'extrémité *b* ; le vent sort en *o* par une très petite ouverture. *r* est un réservoir destiné à condenser la vapeur de l'haleine. M. Luca fait ce réservoir en caoutchouc vulcanisé, et dispose une soupape qui s'oppose au retour de l'air vers la bouche. Le caoutchouc s'étend pendant qu'on souffle, et réagit par son élasticité, de manière que la sortie de l'air est continue, même quand on souffle d'une manière intermittente.



Fig. 782.

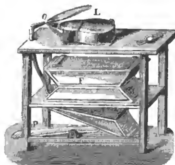


Fig. 783.

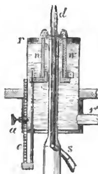


Fig. 784.

Lampe d'émailleur. — Dans cet appareil, qui sert à souffler le verre, le vent d'un soufflet à vent continu F (*fig.* 783) que l'on fait jouer au moyen d'une pédale P, est dirigé par un bec effilé *o* sur la flamme d'une lampe à huile L. Il faut un tâtonnement assez long et une certaine habitude pour disposer la mèche de manière à obtenir un bon *dard*.

M. Peclet a imaginé une forme de bec qui évite cette difficulté. L'huile arrive d'un flacon de Mariotte dans le réservoir *rr'* (*fig.* 784) par le tube *r'* ; la mèche *nn*, composée de plusieurs couches concentriques, peut s'élever à volonté au moyen de la crémaillère *c* et du pignon *a*. Le vent du soufflet arrive en *s* et sort par le centre de la mèche *nn*. Il entraîne l'air environnant par communication latérale de mouvement, et il en résulte une véritable aspiration qui fait que la flamme se porte vers l'axe de la mèche, où elle reçoit le courant d'air, de manière à former le dard *d*.

Quand on a à sa disposition un bec de gaz d'éclairage, on obtient facilement un beau dard, dont on peut faire varier à volonté les dimensions en ouvrant plus ou moins le robinet de sortie.

Chalumeau à vapeurs combustibles. — Le plus anciennement connu de ces appareils est l'éolipyle à alcool dont on se sert pour courber les tubes et souffler le verre. La *fig.* 785 représente une des formes de ce petit appareil. L est une lampe à alcool dont la flamme volatilise d'autre alcool contenu dans le réservoir *r*. La vapeur passe par le tube *t*, s'échappe par l'orifice *o* en entraînant l'air environnant, et chasse la flamme de la lampe L, dont la combustion se trouve ainsi activée. La *fig.* 693 (p. 343) représente une autre disposition du même appareil.

Le chalumeau à essence de M. de Richemond est très économique et en même temps très commode pour souder les métaux précieux et pour travailler le verre : une lampe à huile met en ébullition de l'essence de térébenthine contenue dans une petite chaudière en cuivre fermée à sa partie supérieure. Un courant d'air passe à travers la vapeur et l'entraîne dans un tube à l'orifice duquel on l'enflamme. Un autre courant d'air arrive par un tube concentrique au premier, et se mêle à la vapeur d'essence, dont la combustion est ainsi très vive. Les deux courants d'air proviennent d'un soufflet que l'on fait mouvoir au moyen d'une pédale. M. Sainte-Claire Deville a imaginé de son côté sous le nom de *lampe-forge*, un appareil à essence qui permet d'expérimenter dans un creuset sur une dixaine de centimètres cubes de substance[1].

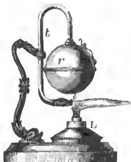


Fig. 785.

Chalumeau à oxygène et hydrogène. — La température la plus élevée que l'on puisse obtenir par la combustion est celle que fournit un mélange de 1 volume d'oxygène et de 2 d'hydrogène. Dans le *chalumeau de Hare*, les deux gaz sont rassemblés dans deux gazomètres, ou dans deux sacs en caoutchouc séparés, et sont chassés par des tubes distincts dans un seul et même tube, d'où ils s'échappent par un très petit orifice après s'être mélangés. Des robinets sont disposés de manière qu'il arrive deux fois plus d'hydrogène que d'oxygène.

Dans le *chalumeau de Newmann*, ou de Brook qui en a eu le premier l'idée, les deux gaz sont comprimés dans un même récipient au moyen d'une pompe foulante. Quand on ouvre un robinet, ils traversent un tube dans lequel il y a un grand nombre de rondelles de toile métallique, d'où le mélange se rend à l'orifice où on l'enflamme. Les toiles métalliques empêchent l'inflammation de se propager à l'intérieur du récipient, ce qui produirait une explosion terrible.

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XLVI, p. 184.

Avec le chalumeau à oxygène et hydrogène, on fond des substances excessivement réfractaires ; l'or, l'argent, le platine entrent en ébullition ; la silice, l'alumine, une foule de pierres précieuses, la chaux même peuvent être fondues.

La flamme si chaude du chalumeau à oxygène et hydrogène est à peine visible en plein jour, parce qu'elle ne contient pas de substance solide. Si l'on y introduit la pointe d'un morceau de craie qui en prend la température, il se produit une lumière tellement vive que l'œil ne peut en supporter l'éclat. C'est ce qu'on nomme la *lumière Drummond*.

Chalumeau aérhydrique. — La flamme de ce chalumeau est produite par un mélange d'hydrogène et d'air. L'air est fourni par un soufflet à vent continu, et l'hydrogène, par un appareil disposé comme celui du briquet à gaz hydrogène (I, 384). Les deux gaz sont conduits par des tubes en caoutchouc, à un bec, dans lequel ils se mélangent avant de sortir par l'orifice où on les enflamme. Il résulte de cette disposition que l'on peut apporter ce dard enflammé sur un point du corps que l'on veut échauffer. C'est un véritable *outil de feu* avec lequel on peut souder des lames de plomb en en fondant les bords, et sans matière intermédiaire. Cet instrument précieux, dû à M. de Richemond, rend des services éminents dans l'industrie.

III. Mesure de la chaleur dégagée dans les actions chimiques.

1059. L'étude des *quantités de chaleur* qui se dégagent dans les actions chimiques forme une des parties les plus importantes de la calorimétrie, tant sous le rapport des nombreuses questions théoriques qui se rattachent au sujet, que sous celui du parti que l'industrie peut tirer de cette connaissance pour apprécier la valeur des différents combustibles.

L'attention des physiciens s'est d'abord portée exclusivement sur la combustion. On nomme *pouvoir calorifique* d'un combustible *le nombre de calories qui se dégagent quand on brûle l'unité de poids de ce combustible.*

Les premières recherches sur la chaleur dégagée dans la combustion ont été faites vers 1780, par Lavoisier et Laplace, en brûlant dans leur calorimètre, un poids connu de la substance, au moyen d'un courant d'air porté à 0° par son passage à travers un tuyau entouré de glace. Les produits gazeux de la combustion étaient aussi ramenés à 0° par leur passage à travers de la glace fondante, et l'eau de fusion était ajoutée à celle qui s'échappait du calorimètre. Ce procédé, employé plus tard par Rumfort, comporte beaucoup d'incertitudes ; aussi, les nombres trouvés diffèrent-ils notablement de ceux qui ont été obtenus depuis.

Calorimètre de Rumfort. — Rumfort, en 1814, a fait des expériences au moyen d'un calorimètre particulier représenté (*fig.* 786). C'est une caisse en

cuivre C, contenant un poids connu d'eau, dans laquelle circule un serpentin horizontal S très aplati, dont on voit une projection horizontale, en *s* (*fig.* 787). Le serpentin sort de la caisse en O, *o* (*fig.* 786 et 787), et se termine en A, *a* par un entonnoir au-dessous duquel on brûle les matières en expérience. Les produits gazeux de la combustion circulent lentement dans le serpentin horizontal, et déposent sur sa surface intérieure, qui est très grande par rapport à sa section, presque tout l'excès de chaleur qu'ils contiennent. On conclut de l'échauffement du calorimètre produit par la combustion d'un poids connu de matière, la quantité de chaleur fournie par le combustible.

La température était donnée par un thermomètre *t* (*fig.* 786), dont le réservoir occupait presque toute la profondeur de l'eau. Pour éviter l'erreur provenant de la perte de chaleur par l'extérieur, Rumfort appliquait sa méthode de compensation (887); et pour recueillir l'excès de chaleur que les gaz pouvaient emporter à leur sortie du serpentin, il leur faisait traverser le serpentin d'un second calorimètre semblable au premier. Des précautions minutieuses étaient prises pour que la combustion fût complète : les bois étaient débités en minces rubans au moyen de la varlope; les liquides étaient mis dans une lampe, et la perte de poids après l'expérience représentait le poids du liquide brûlé.

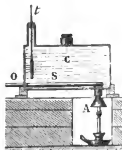


Fig. 786.

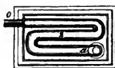


Fig. 787.

La principale cause d'erreur, dans ces expériences, provient de la chaleur rayonnée par le combustible, et qui n'entre pas dans le serpentin. Les solides, qui rayonnent beaucoup plus que les flammes, ne pouvaient donc donner de résultats satisfaisants; aussi Rumfort a-t-il été forcé de renoncer à mesurer la chaleur produite par le charbon.

Hassenfratz et Clément Desormes ont ajouté beaucoup de résultats à ceux que l'on connaissait déjà; ils opéraient soit au moyen du calorimètre de Rumfort, soit au moyen de celui de Lavoisier et Laplace.

1060. Loi de Welter. — J. J. Welter, en 1822[1], en comparant les résultats obtenus par divers expérimentateurs, remarqua qu'ils tendaient à satisfaire à la loi suivante : *les corps, en brûlant avec la même quantité d'oxygène, dégagent des quantités de chaleur égales entre elles ou multiples les unes des autres.* Les expériences qui ont été faites depuis n'ont pas confirmé cette loi. Par exemple, il résulte des recherches de Dulong (1062), que les quantités de chaleur dégagées par la combustion de poids égaux de carbone et

[1] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. XIX, p. 425.

d'hydrogène, sont entre elles à peu près comme 1 : 5, tandis que les quantités d'oxygène absorbées sont entre elles comme 1 : 3.

1061. Expériences de M. Despretz. — M. Despretz, à l'occasion d'un grand travail sur la chaleur animale, couronné en 1823 par l'Académie des sciences de Paris, a mesuré avec beaucoup de soin le pouvoir calorifique du carbone et de l'hydrogène[1]. Il s'est servi d'un calorimètre analogue à celui de Rumfort, mais notablement perfectionné. La principale modification consistait en ce que le combustible brûlait dans une caisse entièrement plongée dans l'eau du calorimètre, de manière qu'aucune portion de la chaleur produite ne pouvait être perdue. De l'air ou du gaz oxygène desséchés étaient amenés de gazomètres à mercure dans cette caisse; les produits de la combustion en sortaient par un tube contourné en serpentin qui l'enveloppait de toute part. La température du gaz, à son entrée et à sa sortie, était donnée par deux thermomètres très sensibles. Quatre agitateurs rendaient uniforme la température de l'eau du calorimètre, et la perte de chaleur extérieure était calculée, au moyen de la loi de Newton (887). Le carbone était préparé par la décomposition du sucre pur dans un creuset soumis à un feu de forge. On doit regretter de ne pas trouver dans l'exposé du travail de M. Despretz tous les détails qu'il serait si utile de connaître pour bien apprécier ces expériences remarquables, qui ont fait époque dans l'histoire de la calorimétrie.

Dans un second travail, M. Despretz a mesuré le pouvoir calorifique du carbone, de l'hydrogène, du phosphore et de plusieurs métaux. Il a trouvé que, *en absorbant un gramme d'oxygène*, l'*hydrogène* dégage 2578 calories, le *charbon* 2967, le *fer* 5325. Le *phosphore*, le *zinc* et l'*étain* ont donné à peu près le même résultat que le *fer*.

M. Despretz a conclu de son travail que la quantité de chaleur dégagée par un corps est constante, quelle que soit la pression de l'oxygène dans lequel il brûle, quand le volume du gaz produit par la combustion est le même que celui de l'oxygène. C'est ce qui a lieu quand le charbon brûle, l'acide carbonique formé ayant le même volume que l'oxygène employé. Ce résultat n'a été constaté que sur le carbone; mais M. Despretz regarde comme probable qu'il serait le même avec le soufre et tous les corps avec lesquels le volume de l'oxygène reste le même après la combustion. Il pense aussi que, dans les cas où l'oxygène passe à l'état solide en se combinant, comme dans la combustion du phosphore et des métaux, la quantité de chaleur dégagée doit être d'autant plus faible que la pression de l'oxygène est plus grande : la différence tiendrait à ce que l'oxygène pour se solidifier dans le composé formé, doit abandonner de la chaleur en quantité d'autant plus grande qu'il se condense davantage, c'est-à-dire qu'il est employé à une plus faible pression.

Nous avons rassemblé dans le tableau suivant les résultats trouvés par divers physiciens :

[1] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. XXVI, p. 344; et XXXVII, p. 180.

SUBSTANCES.	CALORIES dégagées par 1 gr.	EXPÉRIMENTATEURS.
Hydrogène	23352	Laplace et Lavoisier.
	23294	Clément et Désormes.
	23640	Despretz.
Charbon	7624	Laplace et Lavoisier.
	5761	Crawfort.
	6375	Hassenfratz.
	7386	Clément et Désormes.
	7915	Despretz.
Bois	4314	Rumfort.
Phosphore	7900	Laplace et Lavoisier.
Huile de colza	9307	Rumfort.
Huile d'olive	11762	Laplace et Lavoisier.
	9044	Rumfort.
Suif	7569	Laplace et Lavoisier.
	8369	Rumfort.
Cire blanche	10520	Laplace et Lavoisier.
	9479	Rumfort.
Ether	8030	Id.
Alcool à 42 degrés Beaumé	6195	Id.
Alcool à 33 degrés	5261	Id.
Naphte	7338	Id.

1062. Recherches de Dulong. — On voit qu'il existe des différences notables entre les nombres trouvés par les divers physiciens. Dulong avait entrepris un grand travail sur la chaleur dégagée par la combustion, lorsqu'il a été fatalement enlevé à la science. Heureusement, il avait communiqué à M. Hess de St-Pétersbourg quelques-unes des lois auxquelles il était parvenu, et l'on a trouvé dans ses papiers quelques résultats qu'il avait calculés. Enfin, M. Cabart, qui avait été témoin des expériences, a pu donner la description du calorimètre, dont on n'a retrouvé que la partie intérieure[1]. C'est d'après cette description qu'a été faite la coupe représentée dans la *fig.* 788.

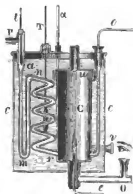


Fig. 788.

Le corps qui doit être brûlé est renfermé dans une caisse rectangulaire, ou *chambre à combustion*, C, en cuivre, ayant 25cm de hauteur, 7cm,5 de largeur, et 10cm de profondeur, elle est fermée à sa partie supérieure par un couvercle *u*, dont les bords rabattus plongent dans une rigole remplie de mercure. L'oxygéne arrive dans la chambre C, tantôt par le tube O

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. VIII, p. 183.

placé à sa partie inférieure, tantôt par le tube *o* qui aboutit au bas de la chambre. Ces tubes sont aplatis et à section rectangulaire, excepté à leurs deux extrémités, où ils sont cylindriques. Les produits gazeux de la combustion sortent par un canal à section rectangulaire *rnm*P, de 5^{cm} de largeur, replié plusieurs fois en *rn*, d'où ils se rendent dans un gazomètre. Le thermomètre *t* donne leur température. Toute cette partie de l'appareil est renfermée dans une caisse cc remplie d'eau, dans laquelle se meut un agitateur dont la tige est en α. La température de cette eau est donnée par deux thermomètres, dont un se voit en T.

Les corps étaient brûlés dans la partie inférieure de la chambre C; le fer était roulé en spirale, et les autres métaux étaient placés en poudre dans une capsule rectangulaire en platine ou en cuivre. On les mélangeait avec une matière inerte, quand on craignait leur agglutination par la chaleur, et l'on y mettait le feu au moyen d'amadou. Pour le charbon, on le taillait en cône aigu, qu'on introduisait dans la chambre *c* après avoir allumé la pointe.

Les gaz étaient brûlés à l'extrémité d'un tube effilé, *e*, dont l'orifice variait, suivant que le gaz était plus ou moins facile à brûler. Les liquides étaient placés dans un tube de verre fermé par le bas, et dans lequel plongeaient quelques brins de coton. Un regard *v*, fermé en dehors par une lame de verre, permettait de suivre la marche de la combustion. On ne sait pas par quel moyen on enflammait les gaz et les liquides.

La perte de chaleur par l'extérieur était évitée par la méthode de Rumfort, et la quantité de chaleur dégagée se calculait en l'égalant à celle qu'avait absorbée le calorimètre.

Il résulte de quelques lignes manuscrites laissées par Dulong, qu'il avait soupçonné l'existence d'un rapport simple entre les chaleurs spécifiques des corps et les quantités de chaleur dégagées par leur combinaison avec une même quantité d'oxygène.

1063. Lois relatives aux combustibles composés. — C'est principalement à l'occasion des travaux de ce célèbre physicien qu'ont été soulevées les deux questions importantes qui suivent :

1° La quantité de chaleur dégagée est-elle la même quand un corps simple, en brûlant, atteint immédiatement le maximum d'oxygénation, et quand il ne l'atteint qu'à différentes reprises? C'est ce qui a lieu généralement, comme nous en verrons la preuve un peu plus loin; par exemple, 1 gramme de charbon dégage, pour passer à l'état d'acide carbonique, une quantité de chaleur égale à celle qui se développe quand la même masse de charbon passe à l'état d'oxyde de carbone, augmentée de celle que produirait cet oxyde en brûlant pour former de l'acide carbonique.

2° La quantité de chaleur dégagée par la combustion d'un corps composé est-elle égale à la somme des quantités de chaleur que produiraient ses éléments en brûlant séparément? En partant des nombres trouvés par Dulong, on trouve que la réponse doit être négative. Le plus souvent, la chaleur du composé est

plus petite que la somme en question. Nous reviendrons bientôt sur cette question importante.

Voici le tableau des principaux résultats trouvés dans les manuscrits de Dulong ; l'unité de chaleur est rapportée à 1 *gramme d'eau* :

SUBSTANCES.	CHALEUR PRODUITE PAR			OBSERVATIONS.
	1 litre à 0°, et 0m,76.	1 gr. de substance.	1 litre d'oxygène.	
Hydrogène	3106,6	34601	6212	Moyenne de 5 expériences.
Id. dans le *protox. d'azote*	5220,7	»	»	Il se produit de l'ac. nitreux.
Gaz des marais.......	7587,7	»	4793	Moyenne de 3 expériences.
Oxyde de carbone.....	3130,3	»	»	Il a été mêlé avec un vol. égal d'hydrogène. — 3 expér.
Id dans le *protox. d'azote*	5549	»	»	Il se produit de l'ac. nitreux.
Gaz oléfiant.........	15338	»	»	Moyenne de 5 expériences.
Cyanogène	12270,3	»	»	Il se forme un peu d'ac. nit. — 3 expériences.
Alcool absolu	14375,5	7087	»	Moyenne de 2 expériences.
Ether..............	33353	9431	»	Id.
Essence de térébenthine.	70607	10836	»	
Huile d'olive.........	»	9862	»	
Charbon............	7858	7295	»	On admet que l'ac carbonique contient 1 v. d'ox. et $\frac{1}{2}$ v. de vapeur de carbone condensés en un seul.
Soufre	»	2601	»	Production d'ac. sulfurique anhydre.
Fer	»	»	6216	Moyenne de 2 expériences.
Etain..............	»	»	6508	Moyenne de 3 expériences.
Protoxyde d'étain.....	»	»	6477	Il a dû se former une combinaison entre le protoxyde et le peroxyde.
Cuivre	»	»	3722	Moyenne de 3 expériences.
Protoxyde de cuivre ...	»	»	3430	Une seule expérience.
Antimoine...........	»	»	5481,6	Le produit est de l'ac. antimonieux. Moy. de 5 expér.
Zinc...............	»	»	7576,6	Moyenne de 3 expériences.
Cobalt	»	»	5721	Une seule expérience.
Nickel	»	»	5333	Id.

Il est à remarquer que les résultats trouvés par Dulong diffèrent notablement de ceux qui ont été publiés par les physiciens qui l'ont précédé; c'est surtout pour le gaz hydrogène que la différence est prononcée. Malgré la confiance que l'on accorde avec raison à un physicien aussi consciencieux que Dulong, l'incertitude qui reste sur la méthode qu'il employait et l'état incomplet dans lequel est resté son travail, ont fait penser que de nouvelles recherches sur ce sujet étaient indispensables. En 1841, l'Académie des sciences de Toulouse mit au concours la recherche des quantités de chaleur dégagées dans la combustion, et l'Académie de Paris proposa, en 1842, la question plus générale de la mesure de la chaleur dégagée dans les actions chimiques. Ce double appel a donné naissance à divers travaux remarquables, dont nous allons rendre compte.

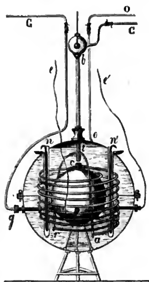


Fig. 789.

1064. Expériences de MM. Dauriac et Sahuquié. — Le calorimètre qui a servi à ces expériences se compose de deux sphères concentriques en cuivre mince (*fig.* 789). La sphère extérieure a 30 centimètres de diamètre; elle se compose de deux parties, réunies par des vis suivant un grand cercle horizontal. La sphère intérieure, qui constitue le *foyer* ou *chambre à combustion*, a 15 centimètres de diamètre; elle est formée aussi de deux hémisphères, que l'on réunit au moyen de vis. Une bande de papier huilé est interposée, de manière à fermer exactement les joints. Dans le *foyer*, est disposée une légère grille en platine, sur laquelle on place le combustible, quand il est solide ou liquide. L'intervalle entre les deux sphères contient 15 kil. d'eau.

De la partie supérieure *c* du foyer, partent deux serpentins communiquant avec les tubes *rt*, *at* qui conduisent les produits de la combustion dans un gazomètre, par la cheminée *tb* et le tube C. Un thermomètre placé dans une boule en verre, *b*, donne leur température à la sortie.

L'oxygène arrive dans la chambre à combustion par le tube O*o*. Ce gaz vient d'un gazomètre gradué; il est desséché et purifié par son passage à travers des tubes en U remplis des substances convenables. Quand le combustible est un gaz, il arrive par le tube G*g*. La partie horizontale *g* de ce tube peut glisser dans une tubulure garnie de liége que porte la sphère extérieure, afin de faciliter l'ajustement de l'appareil. Le tube O*o* présente une semblable disposition dans sa partie inférieure.

Pour enflammer le combustible, on emploie l'électricité : deux fils de

platine *e*, *e'* pénètrent dans le foyer à travers des tubes de verre logés dans des tubes en cuivre disposés comme ceux qui amènent les gaz. Ces fils de platine sont attachés, dans la chambre à combustion, à deux cônes en charbon, fixés par un peu de mastic à une lame de verre, de manière que leurs pointes se touchent. Si l'on fait communiquer les extrémités extérieures des fils *e*, *e'* avec les pôles d'*une pile galvanique*, les sommets des cônes de charbon deviennent incandescents et mettent le feu au combustible.

La température de l'eau du calorimètre est donnée à chaque instant par trois thermomètres ; un thermomètre ordinaire à long réservoir, et deux thermomètres à poids *n*, *n'*. Ces trois instruments plongent dans des tubes en fer remplis de mercure, s'enfonçant dans la grande sphère. Enfin, cette sphère est soutenue par trois pieds en cristal, dans une cave artificielle analogue à celle de la *fig.* 648 ; les divers tubes qui surmontent le calorimètre sortent par l'ouverture du couvercle. Les pertes de chaleur par le rayonnement et par le contact de l'air extérieur se calculaient par la méthode ordinaire (887).

1065. Expériences de MM. Favre et Silbermann. — Les recherches les plus complètes qui aient été faites sur la mesure de la chaleur dégagée dans les actions chimiques en général, sont celles que MM. Favre et Silbermann ont entreprises en 1844 et poursuivies avec persévérance[1]. La *fig.* 790 représente une coupe du calorimètre qu'ils ont employé pour les combustions vives. *aa* est le calorimètre proprement dit, en cuivre, et argenté, pour rendre son pouvoir émissif très faible. Il contient 2 litres d'eau, que l'on agite au moyen de pièces *ee'e*, menées par un mouvement d'horlogerie. Une rigole extérieure recueille l'eau qui pourrait être projetée par l'agitation, ou entraînée par capillarité entre les bords du calorimètre et ceux de son couvercle.

Le couvercle est muni de trois tubulures : deux laissent passer les tiges *e*, *e* de l'agitateur, et la troisième, la tige d'un thermomètre. Au centre, est une large ouverture destinée à introduire la chambre à combustion A.

Le calorimètre *aa* est renfermé dans une caisse cylindrique VV argentée en dedans. Entre les deux vases, se trouve une peau de cygne, le duvet du côté du calorimètre, destinée à empêcher la circulation de l'air. Le calorimètre s'appuie sur quatre pieds en liège, *nn*, réunis par des tubes de verre et reposant sur la peau de cygne.

Une dernière enveloppe I, I retient une couche d'eau destinée à éviter l'influence des variations de la température extérieure ; dans cette eau est plongé un thermomètre. Enfin, un disque de carton, garni de duvet en dessous, recouvre tout l'appareil. Ce disque, muni d'échancrures convenables, peut se séparer en deux suivant un diamètre.

Dans la *fig.* 793 on voit en C l'ensemble du calorimètre et de ses enveloppes, reposant sur un socle en bois, appuyé lui-même sur un plateau en métal muni

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e s., t. XXXIV, p. 357 ; t. XXXVI, p. 5 et 33 ; t. XXXVII, p. 406.

de vis calantes. De ce plateau partent trois montants métalliques qui supportent un plateau triangulaire percé de trous, dans lesquels sont fixées les tiges des thermomètres. Q est un poids qui fait mouvoir les rouages qui mènent l'agitateur par l'intermédiaire du levier *nm*.

La *chambre à combustion* A, A′ (*fig.* 790 et 791) est en cuivre doré; son couvercle est vissé, et porte trois montants *q*, *q*... qui servent à le suspendre au couvercle du calorimètre *aa*, et permettent de l'enfoncer à différentes profondeurs.

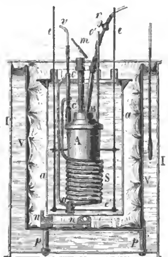


Fig. 790. — 1/5.



Fig. 791. — 1/5.

L'oxygène arrive dans la chambre à combustion par le tube *o′*, *o″* (*fig.* 790 et 791); les produits de la combustion passent par la tubulure *c′*, *c″* dans un serpentin en cuivre S, ayant 2 mètres de longueur, et en sortent par le tube *cr*. En *o* est un petit vase destiné à recevoir les vapeurs qui peuvent se condenser; on peut le dévisser, pour recueillir le liquide qu'il contient. Le serpentin peut s'enlever avec le tube *cc′* qui s'engage dans la tubulure *c′*, *c″*.

Les combustibles solides ou liquides sont placés dans la partie inférieure la plus étroite de la chambre A′ (*fig.* 791), et contenus dans divers petits vases métalliques appropriés à leur nature. Comme ces substances sont plus ou moins volatiles, il est utile de faire plonger ces vases dans un peu d'eau empruntée au calorimètre. Ils sont suspendus au bouchon rodé *b* au moyen d'une douille à mouvement de baïonnette (*fig.* 796). Le bouchon *b* (*fig.* 791) sert à fermer l'ouverture supérieure de la chambre à combustion; il porte à sa partie supérieure deux tubulures *t*, *t′*. La tubulure centrale *t* sert à manœuvrer le bouchon; elle est fermée par une masse transparente *athermane u*, formée de disques d'alun, de quartz et de verre. On peut, à travers ces disques, suivre la marche de la combustion, au moyen d'un petit miroir *m*, *m′* (*fig.* 790 et 791), incliné à 45°, qui renvoie latéralement les rayons lumineux. La tubulure *t′* (*fig.* 791) reçoit le bec H (*fig.* 792) qui apporte les gaz à brûler, ou le bec O destiné à amener de l'oxygène, ou enfin le bouchon B quand on n'a pas de gaz à introduire.

Ensemble de l'appareil. — Les *fig.* 793 et 794 représentent l'ensemble de l'appareil. L'oxygène se forme dans la cornue O (*fig.* 794), se lave dans le flacon *f*, et se rend d'abord dans le gazomètre réservoir R ; de là il passe, par le tube *o″o′oo* (*fig.* 794 et 793), dans un grand flacon F, après avoir traversé l'eau d'un flacon *f′* muni d'un tube de sûreté qui sert en même temps à indiquer la pression. Le flacon F sert de gazomètre régulateur, destiné à fournir au calorimètre un courant constant d'oxygène. Ce gaz est déplacé par de l'eau privée d'air par l'ébullition, venant d'un vase de Mariotte V. Quand il est nécessaire que l'oxygène soit sec, on lui fait traverser un flacon D rempli d'acide sulfurique concentré, puis des tubes en U, représentés en *c*, les uns remplis de ponce imbibée d'acide sulfurique, les autres de fragments de potasse calcinée.



Fig. 792. — 1/5.

Derrière le flacon F, on en voit un autre, surmonté également d'un vase de Mariotte. Cette partie de l'appareil est destinée aux gaz combustibles qui peuvent être mis en contact avec l'eau. Quand ces gaz doivent être desséchés, ils traversent des appareils semblables à ceux qui servent à la dessiccation de l'oxygène. Les gaz qui ne peuvent être recueillis sur l'eau sont renfermés dans des sacs en caoutchouc chargés de poids.

. Les produits gazeux de la combustion à leur sortie du calorimètre C passent à travers divers tubes *abTtt′* (*fig.* 793 et 794) dans lesquels ils sont en partie absorbés. La portion qui n'est pas absorbée se rend, avec l'oxygène non employé, dans une cloche P reposant sur l'eau, pour être utilisée de nouveau ou analysée s'il y a lieu.

La température du calorimètre est donnée par un thermomètre dont on lit les divisions avec un cathétomètre K. Pour éviter les erreurs de lecture, une pointe qui se meut avec la lunette parcourt une division *r* semblable à celle du thermomètre. Ce thermomètre et celui qui donne la température de la couche d'eau enveloppante, sont fixés au moyen d'une barre horizontale que l'on voit au-dessus du calorimètre C, à gauche (*fig.* 793), et au moyen de brides contre lesquelles les extrémités de leurs tiges viennent butter, et qui sont fixées sur le plateau triangulaire du support du calorimètre.

Correction relative à la perte extérieure de chaleur. — On observait de minute en minute l'excès de la température du calorimètre sur celle de la couche d'eau enveloppante. Des expériences préliminaires ayant fait voir que, pour un excès de 1°, l'abaissement de température du calorimètre était de 0°,002 par minute, on multipliait par 0°,002 les excès obtenus pendant chaque minute, on les additionnait et l'on ajoutait la somme à la température finale du calorimètre.

1066. Dispositions pour les divers combustibles. — Quand il s'agit de brûler un gaz, on fait arriver l'oxygène par le tube *o″* (*fig.* 791). Le gaz à

brûler est enflammé à l'extrémité du bec H (*fig.* 792), qu'on introduit aussitôt dans la tubulure *t'* (*fig.* 791). Dans le cas du gaz hydrogène, qui ne produit que de l'eau, on ferme l'extrémité *c* du serpentin, qui devient inutile (*fig.* 790). L'augmentation de poids de la chambre fait connaître le poids de l'eau formée, d'où l'on peut conclure celui de l'hydrogène brûlé.

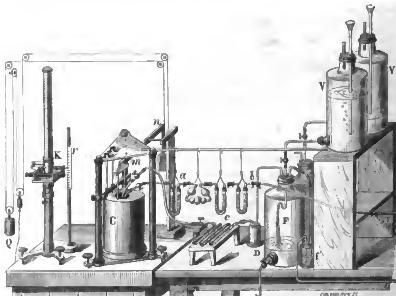


Fig. 793. — $^1/_{20}$.

Pour la combinaison de l'hydrogène avec le chlore, on fait arriver ces deux gaz par la tubulure *t'* au moyen du bec *hcm* (*fig.* 795). Le chlore arrive par un tube de verre *c*, et l'hydrogène par deux tubes de cuivre *h* et *m*, dont le dernier enveloppe le tube *c*. L'extrémité du bec est figurée sur une plus grande échelle en *c'p*. Le chlore arrive par le tube *c'o*, et l'hydrogène par l'espace qui existe autour de ce tube. Les gaz se rencontrent en *o* et se mélangent dans le petit cylindre en platine *op*, ayant 2^{mm} de diamètre. Un petit morceau d'éponge de platine *e* demeure incandescent dans le jet, et l'empêche de s'éteindre. L'acide chlorhydrique formé est amené dans un flacon contenant de l'eau qui le dissout; l'excès d'hydrogène sort à travers un tube rempli de ponce mouillée, qui arrête les dernières traces d'acide. On analyse ensuite la dissolution en la précipitant par l'azotate d'argent, et de la quantité de chlorure d'argent on conclut le poids du chlore, et par suite celui de l'hydrogène employés.

Combustion des corps liquides ou fusibles. — Ces corps sont placés dans de petites lampes en cuivre L (*fig.* 796), de 2 centimètres cubes de

capacité environ, suspendues au bouchon *b* (*fig.* 791). Les corps gras solides sont placés dans une lampe un peu plus grande G; la mèche est en amiante. Après avoir allumé la petite lampe, on l'introduit dans la chambre à combustion dont on ajuste le bouchon *b*, et qu'on enfonce aussitôt dans l'eau du calorimètre. L'oxygène arrive par le tube *o'*.

Le soufre se met dans un petit creuset en porcelaine C (*fig.* 796), pouvant en contenir 4 à 5 grammes. On l'allume au moyen d'une pointe de charbon rouge, et on l'introduit rapidement. Pour que la combustion soit complète, il faut que l'oxygène tourbillonne autour du creuset, ce que l'on obtient en terminant le tube *o"* (*fig.* 791) par un coude qui dirige le gaz tangentiellement aux parois de la chambre. Il ne doit pas y avoir d'eau dans l'intérieur de celle-ci; ce liquide dissoudrait de l'acide sulfureux, et sa présence provoquerait la formation d'un peu d'acide sulfurique.

Combustion du carbone. — Le charbon de bois, privé d'hydrogène par la calcination, se met dans un cylindre en platine P (*fig.* 796), dont le fond

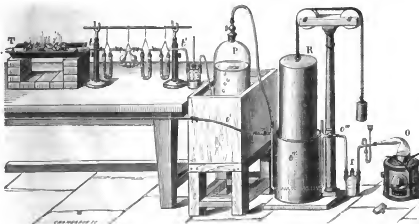


Fig. 794.

est percé de trous. On l'allume en jetant un petit fragment de charbon allumé pesant 4 à 5 milligrammes, par la tubulure *t'* (*fig.* 791); on y ajuste aussitôt le bec O (*fig.* 792), par lequel l'oxygène arrive sur le charbon et traverse sa masse.

Les charbons difficiles à brûler sont placés dans un petit panier en fil de platine *t* (*fig.* 796), que l'on introduit dans le cylindre P; l'espace qui reste autour du panier est rempli de charbon de bois. On tient compte de la chaleur dégagée par ce dernier, dont le poids et le pouvoir calorifiques sont connus d'avance.

MM. Favre et Silbermann ont constaté un fait, déjà observé par MM. Dumas et Stas sur le diamant; c'est qu'on trouve toujours dans la combustion du charbon, un peu d'oxyde de carbone mêlé à l'acide carbonique. Pour tenir compte de cette cause d'erreur, on a commencé par mesurer la chaleur de combustion de l'oxyde de carbone. Ce gaz était mêlé avec un tiers environ d'hydrogène. Après avoir traversé le serpentin, les produits de la combustion déposaient leur eau dans un tube rempli de ponce sulfurique *a* (*fig.* 793), et l'acide carbonique était absorbé dans la partie *ab*, qui pouvait se séparer, et dont l'augmentation de poids représentait le poids de l'acide carbonique formé; on en concluait celui de l'oxyde de carbone brûlé. Le poids de l'hydrogène, dont on déduisait la chaleur qu'il avait produit, se calculait au moyen de celui de l'oxyde de carbone en analysant une partie du mélange, recueillie par un tube de dérivation avant son entrée dans le calorimètre.

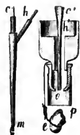


Fig. 795.

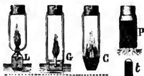


Fig. 796.

Cela posé, pour tenir compte de l'oxyde de carbone formé dans la combustion du carbone, on fait passer ce gaz, qui n'est pas absorbé en *ab* (*fig.* 793), dans un tube de verre T (*fig.* 794) rempli d'oxyde de cuivre chauffé, qui le fait passer à l'état d'acide carbonique, absorbé par les tubes *tt'*. L'augmentation de poids de ces tubes, excepté le premier qui est un tube à dessiccation, fait connaître le poids de l'acide carbonique formé et, par suite, celui de l'oxyde de carbone sorti du calorimètre. On ajoute à la chaleur dégagée dans le calorimètre celle que cet oxyde de carbone eût produite en brûlant.

En opérant ainsi, on suppose que la chaleur dégagée reste la même quand la combinaison se fait à plusieurs reprises, ou tout d'un coup. C'est ce qui a lieu pour l'acide carbonique. En effet, soit x et y les chaleurs de combustion du carbone, quand il forme de l'acide carbonique et de l'oxyde de carbone; p et q les poids de carbone transformés en acide carbonique et en oxyde, et enfin c le nombre total de calories dégagées. Une autre expérience donnera les quantités p', q', c', et l'on aura les deux équations: $px+qy=c$, $p'x+q'y=c'$, d'où l'on tirera les valeurs de x et de y. En mettant à la place de p, q, c, p', q', c' les données de deux expériences, on a trouvé ainsi $x=8097$, et $y=2397{,}8$. Or, 1gr de charbon, en passant à l'état d'acide carbonique, dégage 8080cal; et une quantité d'oxyde de carbone contenant 1gr de carbone en dégage 5607. La différence 2473 entre ces deux nombres représente bien la chaleur de combustion du charbon quand il passe à l'état d'oxyde de carbone; car ce nombre diffère peu de la valeur trouvée pour y. La différence est due en partie à ce que les erreurs qui affectent les données des expériences s'accumulent, quand

on résout les équations, dans les valeurs de x et de y, au lieu de se compenser; aussi la valeur de x diffère-t-elle sensiblement du nombre 8080. On voit aussi que la première oxydation du carbone dégage moins de chaleur que la combustion de l'oxyde formé; ce que l'on peut attribuer au passage du carbone à l'état gazeux, lorsque l'oxyde prend naissance.

1067. Résultats. — Voici le tableau des principaux résultats trouvés:

	NOMS des substances.	FORMULES chimiques.	CHALEUR dégagée par 1 gr. de combustible.		NOMS des substances.	FORMULES chimiques.	CHALEUR dégagée par 1 gr. de combustible.
	Hydrogène	»	34462	Alcools.	Esprit de bois.	C^2H^2,H^2O^2	5307
	Id. avec chlore. . . .	»	23783,3		Alcool de vin	$(C^2H^2)^2,H^2O^2$	7184
	Oxyde de carbone.	»	2403		Alcool amylique	$(C^2H^2)^5,H^2O^2$	8958,6
	Gaz des marais..	C^2H^4	13063		Alcool éthalique	$(C^2H^2)^{16},H^2O^2$	10629,2
Carbone.	Charbon de bois. . . .	»	8080		Acétone..	$(C^2H^2)^3,O^2$	7303
	Charbon de sucre . . .	»	8039,8	Acides $(C^2H^2)^n,O^4$.	Acide formique	C^2H^2,O^4	2000
	Id. des cornues à gaz. .	»	8047,3		Acide acétique.	$(C^2H^2)^2,O^4$	3505
	Graphite naturel. . . .	»	7796,6		Acide butyrique	$(C^2H^2)^4,O^4$	5647
	Id. des hauts fourneaux	»	7762,3		Acide valérique. . . .	$(C^2H^2)^5,O^4$	6439
	Diamant.	»	7770,1		Acide éthalique	$(C^2H^2)^{16},O^4$	9316,5
	Id. chauffé à 500°. . .	»	7878,7		Acide stéarique	$(C^2H^2)^{19},O^4$	9716,5
Soufre.	Soufre natif opaque. . .	»	2261,8	Ethers composés.	Formiate de méthylène.	$(C^2H^2)^2,O^4$	4197,4
	Id. cristall. depuis 1 h.	»	2258,6		Acétate de méthylène..	$(C^2H^2)^3,O^4$	5342
	Id. fondu depuis 7 ans.	»	2216,8		Ether formique.	$(C^2H^2)^3,O^4$	5278,8
	Id. mou, après 1/2 h.	»	2258,4		Ether acétique.	$(C^2H^2)^4,O^4$	6292,7
	Sulfure de carbone.. . . .	»	3400,5		Butyrate de méthylène..	$(C^2H^2)^5,O^4$	6798,5
Bicarbures d'hydrogène.	Gaz oléfiant	$(C^2H^2)^2$	11857,8		Ether butyrique	$(C^2H^2)^6,O^4$	7090,9
	Amylène.	$(C^2H^2)^5$	11491		Valérate de méthylène..	$(C^2H^2)^6,O^4$	7375,6
	Paramylène	$(C^2H^2)^{10}$	11303		Ether valerique.	$(C^2H^2)^7,O^4$	7834,9
	Carbure, bouillant à 180°	$(C^2H^2)^{11}$	11262		Acétate d'amylène. . .	$(C^2H^2)^7,O^4$	7971,2
	Cétène.	$(C^2H^2)^{16}$	11055		Ether valéramylique . .	$(C^2H^2)^{10},O^4$	8543,6
	Métamylène	$(C^2H^2)^{20}$	10928		Blanc de baleine. . . .	$(C^2H^2)^{32},O^4$	10342
Ethers simpl.	Ether sulfurique . .	C^4H^5O	9027,6		Essence de citron..	$C^{10}H^8$	10959
	Ether amylique.... . .	$C^{10}H^{11}O$	10188		Id. de térébenthine. . .	$C^{20}H^{16}$	10852
	Cire d'abeilles.	»	10496		Térébène	$C^{20}H^{16}$	10662

Remarques. — On voit que le pouvoir calorifique trouvé pour l'*hydrogène* diffère à peine de celui qu'a obtenu Dulong ; on peut donc avoir toute confiance dans l'exactitude de cette valeur.

Carbone. — Les différentes variétés de carbone ont donné des nombres différents, tous plus grands que les nombres trouvés par Dulong, qui n'a pas tenu compte de l'oxyde de carbone formé. Les espèces qui dégagent le plus de chaleur sont celles qui ont la plus grande capacité calorifique, et, par conséquent, les moins denses (891) ; cependant le graphite et le diamant, qui produisent à peu près la même quantité de chaleur, ont des capacités très différentes.

Soufre. — Le soufre, étudié à différents états physiques, a conduit à la même loi. Il faut seulement remarquer que le soufre mou, obtenu en versant du soufre pâteux dans l'eau, et le soufre cristallisé en prismes, dégagent la même quantité de chaleur quoique leurs capacités diffèrent notablement.

Sulfure de carbone. — Si l'on fait la somme des quantités de chaleur qui seraient dégagées par la combustion du carbone et du soufre qui entrent dans la composition de 1^{gr} de sulfure de carbone, on trouve un nombre qui surpasse la chaleur de combustion de ce dernier, de $254^{cal},2$. Il en est de même pour le gaz des marais. On voit donc que la chaleur de combustion d'un corps composé n'est pas égale à la somme des quantités de chaleur dégagées par ses éléments. Cependant cette égalité a lieu pour le gaz oléfiant.

Loi des carbures d'hydrogène. — Les carbures d'hydrogène de la formule $(C^2H^2)^n$ ont conduit à cette loi : chaque fois que les éléments du carbure ($C^2H^2 = 4$ vol.) entrent une fois de plus dans la constitution d'un nouveau carbure, la chaleur de combustion diminue de $37^{cal},48$. Par exemple, l'hydrogène $C^{10}H^{10}$ dégageant en brûlant 11491^{cal} ; le paramylène $C^{20}H^{20}$ en dégage 11303 ; or, la loi donne $11491 - 5 \times 37,5 = 11303,5$.

Alcool. — L'alcool absolu et l'alcool hydraté à 80° donnent sensiblement la même chaleur de combustion.

Corps isomères. — On nomme ainsi des composés qui sont formés des mêmes éléments, combinés dans les mêmes proportions. Par exemple, l'*acide acétique* et le *formiate de méthylène*, $(C^2H^2)^2,O^4$; le térébène et l'essence de térébenthine, $C^{20}H^{16}$. Ces composés possèdent des propriétés très différentes ; ce qui s'explique en admettant que les atomes y sont groupés d'une manière différente. On pouvait penser que ces corps donneraient la même quantité de chaleur en brûlant ; on voit sur le tableau qui précède qu'il n'en est pas ainsi. En général, les éthers composés fournissent plus de chaleur que les acides qui leur sont isomères. Ce fait montre une fois de plus que la chaleur de combustion d'un composé n'est pas égale à la somme des quantités de chaleur dégagées par ses éléments.

1068. EFFETS CALORIFIQUES DANS LES DÉCOMPOSITIONS. — La décomposition des corps, ordinairement accompagnée d'une absorption de chaleur, peut aussi dégager de la chaleur, comme l'ont constaté MM. Favre et Silbermann,

auxquels sont dues les expériences que nous allons citer, à l'exception de celles qui sont relatives au soufre.

Protoxyde d'azote. — Quand le charbon brûle dans le protoxyde d'azote, la quantité de chaleur dégagée, 11158^cal^,2, est plus grande que lorsqu'il brûle dans l'oxygène pur, résultat déjà constaté par Dulong. On en conclut que l'oxygène et l'azote du protoxyde dégagent de la chaleur en se séparant. Si l'on calcule la quantité de chaleur qui se fût dégagée dans l'oxygène pur, pour former les quantités d'acide carbonique et d'oxyde de carbone obtenues par la combustion dans le protoxyde d'azote, et si l'on retranche ces quantités du nombre 11158,2, la différence, 1154 calories, représentera la chaleur dégagée par l'effet de la ségrégation chimique d'une quantité de protoxyde contenant 1^gr^ d'oxygène.

Du reste, le protoxyde d'azote se décompose nettement en azote et oxygène sous l'influence de la chaleur seule. On a donc pu mesurer directement la chaleur de ségrégation de ce corps. Pour cela, le bouchon *b* de la chambre à combustion (*fig.* 791) était disposé comme on le voit en B (*fig.* 797); le protoxyde arrive, par le tube *a*, au fond d'un gros tube en platine, fermé à son extrémité inférieure, puis passe tout autour du tube qui l'a amené, pour se rendre dans un serpentin. Le tube en platine est entouré de charbon placé dans le cylindre *cc'*. Ce charbon est allumé et reçoit l'oxygène par le tube *o*. Le protoxyde d'azote, en partie décomposé par la chaleur, se rend, après avoir traversé le serpentin, dans une cloche reposant sur le mercure. Ce gaz est ainsi séparé des produits de la combustion du charbon, qui se répandent dans la chambre à combustion, et en sortent comme à l'ordinaire. En retranchant, de la chaleur reçue par le calorimètre, celle qui est due à la combustion du charbon, on obtient la chaleur dégagée par la décomposition d'une partie du protoxyde. L'analyse du gaz recueilli sur le mercure fait connaître la proportion décomposée. On a trouvé ainsi le nombre 1090, qui diffère peu de 1154 cité plus haut.



Fig. 797.

Oxyde d'argent. — Quatre ou cinq grammes d'oxyde d'argent sont renfermés dans un petit creuset en platine muni de son couvercle. Ce creuset est introduit dans le cylindre en platine P (*fig.* 796), et entouré d'un poids connu de charbon dont la combustion fournit la chaleur destinée à décomposer l'oxyde. Cette chaleur étant retranchée de celle que reçoit le calorimètre, on trouve que 1^gr^ d'oxyde dégage en se décomposant, 22^cal^,1. Il faut remarquer que l'oxygène qui se sépare de l'argent passant à l'état gazeux, absorbe une grande partie de la chaleur de décomposition.

Carbonate de chaux. — Cette substance se traite par le même procédé. La perte de poids du creuset donne la quantité décomposée. A l'état de spath d'Islande, le carbonate de chaux *absorbe* 308^cal^ par gramme décomposé; à l'état

d'aragonite, il y a tantôt absorption, tantôt dégagement de chaleur. Cela tient à ce que la chaleur fait changer la structure de l'aragonite (I, 417), et le changement est accompagné d'un dégagement de chaleur. Quand l'aragonite a été d'avance complétement désagrégée par la chaleur, sa décomposition absorbe 299cal,3, nombre qui diffère à peine de 308 trouvé pour le spath d'Islande.

Soufre. — Le soufre, quand il change de structure, dégage aussi de la chaleur. M. Regnault ayant exposé du soufre mou, à une température de 98° dans l'étuve de son appareil destiné à la mesure des capacités calorifiques (896) l'a vu monter à la température de 110° pendant sa transformation rapide en soufre ordinaire. Quand le soufre cristallisé en prismes se transforme en soufre octaédrique (I, 417), il y a aussi dégagement de chaleur; mais pour le constater il faut que la transformation se fasse rapidement. Or, M. Mitscherlich a remarqué qu'elle est singulièrement accélérée par les dissolvants du soufre. Si l'on plonge des cristaux prismatiques, dans du sulfure de carbone saturé de soufre, la transformation est instantanée, et la température s'élève de quelques degrés. M. Mitscherlich a encore opéré ainsi : il fit fondre 50k de soufre et en fit cristalliser une partie dans un vase de bois. Quand la masse eut pris la température extérieure, il enleva les parties où la transformation n'était pas encore commencée, et les porta dans un vase mauvais conducteur, dans lequel il les agita constamment pendant une heure au moyen d'un thermomètre. Ce dernier monta de 12°. Comme l'expérience dure près d'une heure, pour se mettre à l'abri de la perte de chaleur par l'extérieur, le vase était transporté successivement dans des chambres, de plus en plus chaudes, possédant la température indiquée par le thermomètre. Le poids et la capacité du soufre étant connus, on a trouvé que 1gr dégage en se transformant 2cal,27.

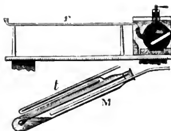


Fig. 798.

Eau oxygénée. — L'eau oxygénée produit de la chaleur en se décomposant. MM. Favre et Silbermann l'ont constaté au moyen du calorimètre à mercure (*fig.* 798), déjà décrit (980). Le liquide est placé dans un tube de verre M, qu'on introduit dans le tube de platine *m* du calorimètre. Un peu de noir de platine, porté par une petite cuiller, détermine la décomposition; et le déplacement du niveau du mercure dans le tube *r* fait connaître le nombre de calories dégagées. Le gaz passant par le tube *t* replié sur lui-même, cède toute sa chaleur avant de sortir du calorimètre. La perte de poids du tube M fait connaître la quantité d'oxygène dégagée. Voici les résultats trouvés par MM. Favre et Silbermann:

		Pour 1 gr. d'oxygène.	Pour 1 gr. de substance.
Décomposition du protoxyde d'azote,	*dégage*	1090 cal., 5	»
— de l'oxyde d'argent,	*absorbe*	»	— 22 cal., 5
— du spath d'Islande,	*absorbe*	»	— 308
Changement de structure de l'aragonite,	*dégage*	»	39,1
Décomposition de l'eau oxygénée,	*dégage*	1303	»

Nous rappellerons enfin qu'il y a de la chaleur dégagée dans la ségrégation de certains alliages (936).

1069. Chaleur des combinaisons par voie humide. — Dans les combinaisons par voie humide, les résultats calorifiques sont compliqués des effets provenant du changement d'état des corps qui se combinent, de la combinaison avec l'eau du composé formé, de sa dissolution dans l'eau, et de la variation de capacité du mélange liquide.

Les premières expériences que nous avons à citer sont celles de M. Hess, sur les combinaisons de l'eau avec l'acide sulfurique, et de divers acides avec différentes bases. La plupart des expériences s'exécutaient au moyen d'un cylindre *kk'* (*fig.* 799), pouvant tourner autour de son axe. On enlevait le couvercle *k*, et l'on versait une des dissolutions dans le compartiment *ck*; l'autre dissolution se mettait dans un vase entouré par la première. On replaçait ensuite le couvercle, en interposant une bande en caoutchouc, et on le fixait au moyen de vis. Le cylindre étant ensuite installé dans une caisse *ab* remplie d'eau, on le faisait tourner autour de son axe, pour mélanger les dissolutions. Des lames de cuivre adaptées au cylindre servaient à agiter l'eau de la caisse, et l'on observait l'élévation de température du thermomètre *t*. La perte extérieure de chaleur était évitée par la méthode de Rumfort, en s'appuyant sur une expérience préalable; il était tenu compte de la capacité calorifique du mélange. Dans le cas de la formation des sels, les dissolutions étaient assez étendues pour que l'addition d'une nouvelle quantité d'eau ne produisit pas de chaleur sensible, et, à cause du grand volume des liquides. M. Hess opérait par la méthode calorimétrique des mélanges.

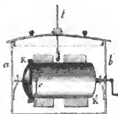


Fig. 799.

M. Andrews a principalement étudié les combinaisons des acides et des bases [1]; il opérait par la méthode des mélanges.

M. Graham s'est occupé particulièrement des combinaisons des sels et de divers acides avec l'eau. Il se servait d'un vase en platine, dans lequel il plaçait l'eau, et introduisait ensuite les substances en quantités représentant un équivalent. Il a donné ses résultats en degrés.

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. IV, p. 316.

1070. MM. Favre et Silbermann ont fait un très grand nombre d'expériences sur les combinaisons par voie humide, au moyen de leur calorimètre à mercure. Leur travail est une mine féconde où devront puiser un jour ceux qui se proposeront de découvrir les lois relatives à cet ordre de phénomènes.

Dissolutions dans l'eau. — Les effets calorifiques produits par les combinaisons avec l'eau étaient étudiés de la manière suivante : une petite éprouvette en verre, contenant un poids connu d'eau, était introduite dans le cylindre de platine *m* (*fig.* 798) du calorimètre à mercure, et l'on y faisait passer un poids connu de la substance à dissoudre. S'il s'agissait de l'acide sulfurique, on le dosait au moyen d'une pipette qui en contenait un poids connu. Les gaz, comme l'acide chlorhydrique, l'acide sulfureux et le gaz ammoniac, arrivaient dans l'eau par un tube effilé ; l'augmentation du poids de l'eau faisait connaître celui du gaz dissous. Le poids des sels, introduits en poudre, s'évaluait de la même manière. En se dissolvant, ils donnent toujours du froid, excepté ceux qui sont anhydres ; le tableau suivant donne les résultats trouvés. Le signe + indique qu'il y a échauffement, le sel étant anhydre.

SELS. 1 gr. dans un excès d'eau.	CALORIES.	SELS. 1 gr. dans un excès d'eau.	CALORIES.
Sulfate de potasse.........	35,3	Carbonate de soude.......	52,7
— de soude..........	49,1	— de potasse et eau..	51,5
— d'ammoniaque......	11,1	Phosphate de soude.......	52,3
— de chaux.........	24,7	Hypophosphate de soude...	21,9
— de baryte.........	64,4	Oxalate de soude.........	39,7
— de zinc...........	14,8	— d'eau...........	67,0
— de prot. de fer.....	12,1	— de potasse et eau...	62,1
d'uranyle.........	+ 10.7	Tartrate de soude........	25,2
— de potasse et eau...	25,6	— de potasse........	17,3
— id. et d'alumine...	23,1	— d'eau...........	19,8
— id. et prot. de fer..	21,5	— de potasse et soude.	40,9
— Ammoniaque et alumine	19.0	Chlorure de potassium.....	51,9
Azotate de potasse........	70,5	— de sodium.. ...	8,9
— de soude..........	45,5	— d'ammonium....	65,1
— d'ammoniaque......	65,9	— de calcium.....	15,5
— de chaux.........	27,1	— de barium......	16,9
— de strontiane.......	41,2	— de strontium....	24,9
— de plomb.........	14,9	— de zinc........	+ 92,2
— d'argent....	31,1	— de fer..........	+ 58,3
Acétate de soude..........	28,1	— bich. de cuivre..	+ 73,7
— de chaux.........	3,5	Bromure de potassium.....	37,8
— de plomb.........	14,8	Iodure de potassium......	29,2
— de potasse et eau...	19,3	Sulfure de potassium......	+ 96,9

Le tableau comprend des sels insolubles ou peu solubles. Les résultats qui leur correspondent ont été obtenus en s'appuyant sur des considérations particulières tirées des lois de la chaleur de combinaison des acides avec les bases. (V. p. 499)

L'acide sulfurique à un équivalent d'eau dégage 64^{cal},7 en se combinant avec un second équivalent; et si l'on ajoute de nouveaux équivalents, la chaleur dégagée par chacun d'eux va en diminuant de plus en plus. La courbe (*fig.* 800) donne une idée de la loi de cette diminution; les chiffres inscrits sous l'axe des abscisses indiquent les nombres d'équivalents d'eau, et ceux qui sont écrits à côté de l'axe des ordonnées, les nombres de calories dégagées par la combinaison de l'acide SO^3 avec ce nombre total d'équivalents.

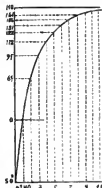


Fig. 800.

Les acides *chlorhydrique, bromhydrique, iodhydrique* ont donné les nombres 449^{cal},6; 235,6 et 147,7; l'*acide sulfureux*, 120,4; et l'*ammoniaque*, 514,3, pour 1 gramme de gaz dissous.

Formation des sels neutres. — Quand un acide se combine avec une base pour former un sel neutre, il y a toujours dégagement de chaleur. Voici comment se faisait l'opération : Une dissolution *titrée* de la base (c'est-à-dire contenant un certain poids de substance sèche dans un volume déterminé) était mesurée dans une pipette, et introduite dans l'éprouvette de verre. L'acide n'avait pas besoin d'être dosé, quand sa dissolution et celle de la base étaient assez étendues pour que l'addition d'une nouvelle quantité d'eau n'y produisît plus d'élévation de température, et pour que la combinaison fût entièrement dissoute; alors il ne se formait pas de sel acide.

Quand il s'agissait d'une base insoluble, la chaleur dégagée s'évaluait par un moyen détourné; on prenait un sel soluble de cette base, et on la précipitait par la potasse ou par l'ammoniaque. S'il n'y avait aucun changement de chaleur, on en concluait que la potasse et l'acide du sel avaient produit, en s'unissant, autant de chaleur qu'en aurait dégagé le même acide en se combinant avec la base précipitée. S'il y avait un changement de température, elle représentait une différence qu'il était facile d'interpréter.

Cette méthode a été contrôlée par le procédé direct; sans cela on aurait pu douter de son exactitude; car elle suppose qu'il y a autant de chaleur absorbée quand deux corps se séparent, qu'il s'en dégage quand ils se combinent; et nous avons vu que les décompositions peuvent dégager de la chaleur (1068).

Voici une partie des résultats trouvés par MM. Favre et Silbermann :

1 GRAMME de	ACIDE sulfurique.	ACIDE azotique.	ACIDE chlorhydrique	ACIDE acétique.
Potasse	342	230	333	297
Soude	520	493	493	439
Ammoniaque	565	527	520	486
Baryte	270	202	201	174
Strontiane	»	»	279	»
Chaux	670	605	606	524
Magnésie	724	642	661	613
Protoxyde de fer	307	268	273	238
Protoxyde de manganèse	346	310	321	285
Protoxyde de zinc	253	203	202	188
Protoxyde de cobalt	310	262	273	244
Protoxyde de nickel	316	275	274	243
Bioxyde de cuivre	194	159	160	131
Protoxyde de cadmium	160	127	128	118
Protoxyde de plomb	102	82	101	64
Protoxyde d'argent	89	53	198	»
Alumine	644	»	»	»
Sesquioxyde de fer	249	»	»	»

On voit que, généralement, les acides les plus énergiques dégagent, avec la même base, le plus de chaleur. L'acide sulfurique donne le maximum, comme M. Graham l'a aussi constaté. Il est encore à remarquer que les divers acides minéraux donnent, avec la même base soluble ou insoluble, à peu près la même quantité de chaleur, pourvu que le sel fourni soit soluble.

Des expériences sur les combinaisons des acides avec diverses bases anhydres ont toujours donné des résultats plus forts qu'avec les mêmes bases hydratées, à cause de la chaleur que dégage la combinaison de la base avec l'eau dans laquelle l'acide est dissous.

Sels acides. — Sels doubles. — On introduit dans l'éprouvette du calorimètre à mercure, 1, 2, 4 ou 8 équivalents d'acide, pesés directement ou évalués au moyen d'une dissolution titrée, et l'on y verse un équivalent de base. Il est à remarquer que s'il y a assez d'eau pour que le sel acide qui pourrait se former ne la sature pas, la chaleur dégagée est la même que dans la formation du sel neutre; tandis que si la liqueur est assez concentrée pour qu'il se dépose quelques cristaux du sel acide, il y a un dégagement de chaleur qui annonce la formation d'une nouvelle combinaison. Il semble donc que, lorsqu'il y a excès d'eau, l'acide peut rester en présence d'un sel neutre dissous contenant le même acide, sans qu'il y ait combinaison.

La formation des sels doubles donne lieu à la même remarque. Il semble donc aussi que deux sels capables de se combiner, ne le font pas, quand il y a

trop de liquide pour que le sel double qui tend à se former puisse le saturer[1], M. Andrews avait trouvé que le passage d'un sel neutre à l'état de sel acide, et que la formation des sels doubles, n'étaient pas accompagnés de chaleur. Cela devait être, car il opérait avec des dissolutions très étendues.

Combinaison des métaux avec l'oxygène, le chlore, etc. — MM. Favre et Silbermann ont fait de nombreuses expériences pour mesurer la quantité de chaleur dégagée dans la combinaison des métaux par voie humide, avec l'oxygène, le chlore, le brome, l'iode et le soufre. La plupart des résultats ont été obtenus par des moyens détournés, et en admettant que la chaleur dégagée par la combinaison de deux corps est égale à celle qui est absorbée dans leur séparation. L'accord qui existe entre les résultats obtenus pour l'oxydation du zinc et du cuivre, et ceux qu'a trouvés Dulong par leur combustion dans l'oxygène, tend à légitimer la méthode indirecte par voie humide.

1071. Equivalents calorifiques. — En comparant les quantités de chaleur dégagées par des masses proportionnelles aux équivalents chimiques des substances qui se combinent, MM. Favre et Silbermann ont formé le tableau suivant des *équivalents calorifiques* des principaux composés binaires; ils nomment ainsi la chaleur dégagée par la combinaison des équivalents chimiques des substances qui s'unissent.

MÉTAUX.	OXYDES		CHLORURES		BROMURES		IODURES		SULFURES	
	dissous	anhyd.	dissous	anhyd.	dissous	anhyd.	dissous	anhyd.	dissous	anhyd.
Hydrogène.	»	34462	40192	23783	28404	9322	15004	—3606	»	2741
Potassium	76238	»	97091	100960	85678	90188	72479	77968	50909	45638
Sodium.	73510	»	94326	94847	82616	»	69143	»	48343	»
Zinc.	»	42151	56567	50296	»	»	»	»	»	20940
Fer.	»	37828	53350	49654	»	»	»	»	»	17753
Cuivre.	»	21885	34500	21885	»	»	»	»	»	9133
Plomb.	»	27675	»	44730	»	32802	»	23208	»	9556
Argent.	»	6113	»	34800	»	25618	»	18651	»	5524

On voit, à l'inspection de ce tableau, que les composés qui donnent le plus de chaleur en se formant, sont ceux qui ont le plus de stabilité. Par exemple, le chlorure d'argent et l'oxyde d'argent, dont le premier est très stable et le second très facile à décomposer, ont des équivalents calorifiques très différents. M. Joule énonce une loi analogue quand il dit que la quantité de chaleur

[1] Cette manière de voir a été confirmée par M. Pasteur, par une méthode fondée sur les propriétés de la lumière polarisée, dont nous parlerons dans l'*optique*.

produite par la combustion de l'équivalent d'un corps est proportionnelle à son affinité pour l'oxygène [1].

La considération des équivalents calorifiques conduit à placer les métalloïdes et les métaux étudiés, dans l'ordre suivant, relativement à l'énergie de leurs affinités :

Métalloïdes.........	*Chlore,*	*brome,*	*oxygène,*	*iode,*	*soufre.*		
Métaux............	*Potassium,*	*sodium,*	*zinc,*	*fer,*	*plomb,*	*cuivre,*	*argent.*

Ce qui s'accorde assez bien avec l'ordre déduit des phénomènes chimiques.

Il est évident que pour comparer, dans les conditions les plus favorables, les équivalents calorifiques, il faut considérer les combinaisons à l'état de dissolution ; car, dans l'état solide, il existe plusieurs causes qui font varier les résultats (1067). En procédant ainsi, MM. Favre et Silbermann ont vu qu'en retranchant, des équivalents des *oxydes* des divers métaux, les équivalents de leurs *chlorures*, on trouve sensiblement la même différence. Il en est de même pour les *bromures, iodures, sulfures*. De même, si l'on retranche les équivalents calorifiques des combinaisons des divers métalloïdes avec un métal, des équivalents de leurs combinaisons avec un autre métal, le reste, ou *module*, est le même, quel que soit le métalloïde considéré.

Cette loi des modules suppose que tous les composés que l'on compare sont dissous ; or, il en est, comme le chlorure d'argent, le chlorure de plomb, qui sont insolubles. Pour qu'ils satisfassent à la loi, on les considère théoriquement à l'état de dissolution ; voici comment : l'expérience prouve que les acides *azotique*, *chlorhydrique*, *bromhydrique* et *iodhydrique* dégagent la même quantité de chaleur quand ils se combinent à une même base, soluble ou non, pour donner des *sels solubles* (1070). Si donc il se forme un sel insoluble, on prendra pour la chaleur de combinaison, celle qui correspond à un sel soluble de la même base, formé avec un autre acide. La différence entre ce nombre théorique et le nombre réel serait alors attribuée uniquement à l'état solide du composé formé. Cette différence représenterait donc la chaleur absorbée par la dissolution *fictive* de ce composé. C'est ainsi qu'ont été obtenus les résultats du tableau ci-dessus (1070) qui se rapportent à des sels insolubles. Il faut remarquer que cette loi des modules est appuyée sur un trop petit nombre de faits ; car on voit dans le tableau, qu'on ne peut la vérifier que sur l'hydrogène, le potassium et le sodium, corps dont les affinités sont tellement semblables, qu'on n'est pas en droit de généraliser. En outre, la loi donnerait, comme l'a remarqué M. Soret, pour équivalent calorifique de l'eau, 15000 calories de moins que l'expérience directe.

[1] Il peut paraître singulier que les équivalents calorifiques qui correspondent au zinc soient plus élevés que ceux qui correspondent à l'hydrogène ; mais l'étonnement cesse quand on sait que M. Grove a décomposé l'eau par la chaleur, à une température à laquelle résistent l'oxyde de zinc et le sesquioxyde de fer.

1072. Des lois de la chaleur des combinaisons chimiques. — Dans les actions chimiques, la chaleur que l'on évalue provient de plusieurs causes réunies : ainsi, il y a des changements d'état accompagnés d'un mouvement de chaleur latente, des décompositions, des changements de volume, des dissolutions. Il n'est donc pas étonnant qu'on n'ait pu faire sortir de la loi générale de la comparaison des résultats obtenus. Cependant plusieurs lois ont été énoncées par divers physiciens. Nous allons indiquer les plus importantes, pour bien marquer l'état de la science dans une question aussi compliquée.

1° La chaleur dégagée dans une combinaison est égale à la chaleur absorbée par la décomposition du composé formé. Cette loi a été vérifiée dans un grand nombre de cas, principalement par MM. Th. Wood, Joule, Favre et Silbermann; on a souvent employé pour évaluer la chaleur absorbée dans les décompositions, un procédé *électro-chimique*, sur lequel nous reviendrons. Mais cette loi semble n'être pas générale, puisqu'il y a de la chaleur dégagée dans certaines décompositions (1068); à moins qu'on n'admette que les mêmes éléments, en se combinant, produiraient du froid.

2° M. Hess a annoncé que les quantités de chaleur dégagées par l'acide sulfurique en se combinant à un ou plusieurs équivalents d'eau, sont entre elles en rapports simples. Il résulte d'expériences faites par MM. Graham, Andrews, Abria, que cette loi n'est pas exacte.

3° M. Hess a aussi avancé qu'il n'y avait pas de chaleur dégagée quand on mêlait deux dissolutions de sels en proportions équivalentes, et qu'ils échangeaient leurs bases et leurs acides. Les expériences de M. Andrews et celles de MM. Favre et Silbermann prouvent qu'il y a dégagement de chaleur quand l'un des nouveaux sels formés est insoluble, ce qui a lieu ordinairement. Le passage de l'un des sels à l'état solide explique ce résultat. La *thermoneutralité* se vérifie dans la double décomposition du sulfate de fer et de l'acétate de potasse, qui ne donne pas de composé insoluble.

4° M. Andrews a conclu de ses recherches, que les équivalents des diverses bases dégagent la même quantité de chaleur en se combinant avec le même acide; loi que MM. Favre et Silbermann ont trouvée inexacte.

5° Les équivalents des différents acides, combinés avec une même base soluble ou insoluble, dégagent la même quantité de chaleur. A cette loi, énoncée par M. Andrews, MM. Favre et Silbermann ont apporté certaines restrictions : il faut que le sel formé soit soluble dans l'eau. Du reste, cette loi n'est qu'approximative, et n'est vraie que pour les acides minéraux, comme on le voit à l'inspection du tableau ci-dessus (1070).

Nous voyons, d'après tout ce qui précède, que les lois bien établies, relatives à la chaleur dégagée dans les actions chimiques, sont en fort petit nombre. Les seules qui paraissent n'être plus sujettes à contestation sont les suivantes, déjà citées : 1° la chaleur de combinaison est la même quand cette combinaison se fait tout d'un coup ou à différentes reprises; 2° la chaleur observée dans la combustion d'un composé est plus faible, le plus souvent, que celle que

dégageraient ses éléments en brûlant séparément; 3° quand le volume du gaz produit est le même que celui de l'oxygène, la quantité de chaleur ne dépend pas de la tension, et elle est la même dans l'air et dans l'oxygène; 4° enfin, un dernier résultat qui découle de l'ensemble des expériences que nous avons décrites, c'est que la quantité de chaleur dégagée ne dépend pas du temps employé à effectuer la combinaison.

1073. Applications à l'industrie. — La mesure des quantités de chaleur dégagées par les divers combustibles est très importante dans l'industrie. Les principaux combustibles usités sont: l'*anthracite*, la *houille*, le *coke*, le *lignite*, le *bois*, la *tourbe*. Dans ces derniers temps, on a chauffé des chaudières à vapeur au moyen de l'alcool. L'usage du gaz d'éclairage pour fournir de la chaleur, commence aussi à se répandre. Depuis un temps immémorial, on utilise dans certains pays, par exemple en Chine, du gaz inflammable (gaz des marais), qui s'échappe du sol dans certaines localités. On pratique des trous de sonde auxquels on ajuste des tuyaux qui conduisent le gaz dans les maisons ou dans les ateliers, et l'on utilise la flamme pour les usages domestiques, pour cuire la chaux ou les briques, et même pour éclairer.

On conçoit que le pouvoir calorifique des combustibles ne peut s'évaluer dans la pratique par les procédés calorimétriques compliqués que nous avons passés en revue; d'ailleurs, on n'a plus besoin d'une aussi grande précision, à cause du défaut d'identité des divers échantillons d'un même combustible. Il suffirait donc de connaître un procédé simple, prompt, et fondé sur des principes sûrs. Malheureusement, les méthodes que l'on possède s'appuient sur des principes douteux.

Méthode de M. Berthier. — Dans cette méthode, on suppose que la quantité de chaleur dégagée par un combustible est proportionnelle à la quantité d'oxygène avec laquelle il se combine. Ce principe, qui n'est autre chose que la loi de Welter (1060), n'est pas exact en général. Mais, quand il s'agit de combustibles qui se présentent au même état physique, comme la houille, le bois, la tourbe, on peut le regarder comme suffisamment approché; ce qui, du reste, a été confirmé par MM. Dauriac et Sahuquié, qui ont trouvé que la loi de Welter s'applique bien aux combustibles qui présentent des propriétés chimiques analogues, comme les corps gras, les alcools, les métaux appartenant à la même section.

Cela posé, la méthode de M. Berthier consiste à déduire la quantité d'oxygène absorbé par un combustible, du poids de plomb qu'on obtient en le brûlant dans la *litharge* ou oxyde de plomb [1]. On met donc dans un creuset en terre siliceuse 1 gramme de combustible réduit en poudre ou en limaille très fine, mêlée avec 20 à 40gr de litharge, l'on superpose 20 à 30gr de litharge pure. Le creuset ne doit être qu'à moitié plein, et muni de son couvercle. On chauffe vivement dans un fourneau à calcination, puis on donne un dernier

[1] *Traité des essais par la voie sèche*, t. I, p. 228.

coup de feu, de manière que l'excès de litharge forme un verre en s'unissant à une partie de la matière du creuset. Quand celui-ci est refroidi, on le casse et on en sépare facilement un culot de plomb qui se détache nettement de la scorie qui est au-dessus, parce que celle-ci contient de la silice empruntée au creuset. On pèse le plomb, et l'on déduit de son poids la quantité d'oxygène qu'il a abandonné. La quantité de chaleur produite est donc proportionnelle au poids de ce métal. Pour la calculer, remarquons que le charbon pur produit en réduisant la litharge, 34 fois son poids de plomb. Si donc P est le poids du plomb, et c le pouvoir calorifique du charbon, la quantité de chaleur dégagée sera $x = \frac{1}{34} P \times c = 212{,}5 P$, en prenant $c = 7224$.

Une autre méthode consiste à chercher, par l'analyse chimique, les quantités relatives de *carbone*, d'*hydrogène* et d'*oxygène* que contient 1gr du combustible, et à calculer le pouvoir calorifique en ajoutant à la chaleur que dégagerait le carbone en brûlant séparément, la chaleur que dégagerait la quantité d'hydrogène qui dépasse celle qui est nécessaire pour former de l'eau avec l'oxygène contenu dans le combustible Ce moyen suppose qu'un corps composé dégage autant de chaleur que ses éléments pris séparément, ce qui n'est pas. En outre, M. Ure a constaté que, plus une houille contient d'hydrogène, moins elle produit de chaleur.

Quand on connaît la valeur calorifique d'un combustible, on peut lui comparer celle d'un autre, en brûlant dans un même foyer des poids égaux de ces combustibles et comparant les échauffements qu'ils communiquent à une même masse d'eau. Ce procédé ne donne qu'une approximation assez vague, parce que ces combustibles, suivant leur état de division et la rapidité de la combustion, ne cèdent pas à l'eau la même fraction de la chaleur qu'ils dégagent.

Le tableau qui suit contient les pouvoirs calorifiques des combustibles les plus usités, la plupart obtenus par la méthode de M. Berthier :

COMBUSTIBLES.	CALORIES pour 1 gramme.	COMBUSTIBLES.	CALORIES pour 1 gramme.
Charbon de chêne.....	7624 à 7670	Lignite...............	4320 à 4830
Braise.............	5972 à 7670	Lignite passant au bitume.	» 6580
Anthracite..........	6800 à 7300	Asphalte..............	» 7500
Huiles grasses........	6730 à 7370	Bois..................	» 4314
Houille sèche........	» 6230	Tourbe......	» 4300

Ces nombres sont nécessairement approximatifs. Nous n'avons pas distingué les différentes espèces de bois, parce que l'expérience montre que, *à poids égal*,

ils dégagent la même quantité de chaleur, ou du moins les différences ne sont pas plus grandes que celles que l'on trouve en opérant sur plusieurs échantillons d'une même espèce. On conçoit que les bois légers, le liége, le coton, etc., dégagent autant de chaleur que les bois les plus denses, quand on sait que toutes ces substances ont la même composition chimique, abstraction faite des matières minérales en petites quantités qui forment la cendre.

Il ne faut pas confondre la quantité de chaleur dégagée, avec la température que peuvent produire les différentes espèces de bois; celle-ci dépend de leur densité et de l'activité avec laquelle ils brûlent. La tourbe dégage presque autant de chaleur que le bois, cependant elle ne donne qu'une faible température. Cela tient à son état spongieux et à l'humidité qu'elle contient. On a essayé de faire disparaître ces inconvénients en la comprimant et en la desséchant. MM. Kingsfort et Holland ont imaginé de réunir les deux opérations en une seule, en comprimant, dans des moules, la tourbe desséchée et encore chaude, après l'avoir broyée par des procédés mécaniques; elle est alors plus dense que l'eau, ne contient plus que 6 à 7 pour cent d'humidité, et brûle sans répandre d'odeur incommode.

IV. De l'équivalent mécanique de la chaleur.

1074. Relations entre la chaleur et le travail dynamique. — Il résulte de l'observation d'un grand nombre de faits que toutes les fois que du *travail mécanique est détruit*, il y a production de chaleur; et réciproquement, toutes les fois que de la chaleur disparaît sans qu'on puisse la retrouver dans les corps environnants, il y a du travail *créé*. Nous allons citer quelques exemples des deux cas.

1° Dans le frottement, la déformation des corps, la compression, il y a dépense d'un certain travail et en même temps apparition de chaleur. Si l'on étire vivement une bande de caoutchouc, il y a travail dépensé et elle devient chaude. Il en est de même, au point où une barre se rétrécit avant de se rompre (1038). Dans l'expérience de M. Le Roux (1038), la lame de bois devient brûlante aux points par lesquels elle est fixée, ou par lesquels on la tient, c'est-à-dire là où le mouvement est détruit et la force vive anéantie. Les actions chimiques sont accompagnées d'un travail moléculaire puisqu'elles ne sont autre chose que des mouvements des molécules; ce travail est détruit et il y a apparition de chaleur. Si l'on fait tourner rapidement un disque de cuivre entre les extrémités des branches d'un fort aimant en fer à cheval, ou mieux d'un *électro-aimant*, sorte d'aimant très puissant animé par l'électricité, on éprouve une grande résistance due à des réactions électriques qui s'exercent entre le disque et l'aimant; en même temps ce disque s'échauffe fortement et d'autant plus que le travail dépensé pour le faire tourner est plus considérable.

Cette expérience, imaginée par M. Joule, puis répétée par M. L. Foucault au moyen des rouages qui lui ont servi à mettre en mouvement son *vibroscope* (I, 126), montre le phénomène dans des conditions toutes particulières.

2° Quand de la chaleur est détruite, il y a du travail créé. Par exemple quand un gaz que l'on échauffe se dilate et pousse un piston, il se refroidit ; il en est de même de la vapeur qui agit par détente. Quand un gaz se dilate, *sans qu'on l'échauffe*, par son expansion en se répandant dans un espace qui lui est offert, il se refroidit parce qu'il développe le travail de sa propre détente. Il en est de même d'une bande de caoutchouc fortement allongée qu'on abandonne à elle-même ; elle se raccourcit en créant du travail et en même temps sa température s'abaisse.

D'autres expériences, dues à M. Joule, montrent qu'il ne disparaît de chaleur qu'autant qu'il se produit un travail mécanique. Nous rappellerons en premier lieu l'expérience des deux récipients égaux (1043), dans lesquels le mouvement du gaz ne produit pas de changement de température ; c'est qu'il n'y a pas de travail mécanique produit. En second lieu, M. Joule fit passer de l'air comprimé à 22 atmosphères, sous une cloche pleine d'eau placée dans un calorimètre ainsi que le récipient, le gaz se dilata en produisant un travail mécanique, puisque l'eau fut déplacée, et il y eut disparition d'une certaine quantité de chaleur. Ces résultats ont été confirmés par M. Regnault, qui a aussi vérifié les expériences suivantes.

Une masse de gaz s'échauffe à 100° en traversant un serpentin, puis se rend dans un calorimètre contenant de l'eau à 0°. Cette eau s'échauffe d'un même nombre de degrés, quand la pression du gaz est de 1 ou de 10 atmosphères. Mais si le gaz à 10 atmosphères se dilate dans le calorimètre de manière à sortir à la pression atmosphérique, l'eau *s'échauffe davantage*. Ce résultat auquel on ne se serait pas attendu, montre combien il est difficile, dans certains cas, de tirer des conclusions des changements d'élasticité des gaz accompagnés d'un travail intérieur difficile à apprécier, le résultat dépendant de la manière dont les changements s'effectuent et de l'ordre dans lequel ils ont lieu.

1075. Equivalent mécanique de la chaleur. — De ces expériences et de beaucoup d'autres, on a conclu que le travail qui disparaît, se transforme en chaleur, et que la chaleur se transforme en travail mécanique quand elle est anéantie. Cela posé, M. Joule nomme *équivalent mécanique de la chaleur*, la quantité de travail qui est produite par une *calorie*, ou, ce qui revient au même, la quantité de travail qui, dépensée pour exercer le frottement, comprimer un corps, etc., dégagerait une calorie. Si cette transformation de la chaleur en travail et *vice versâ* est exacte, la valeur trouvée pour l'équivalent mécanique de la chaleur devra être la même, quelle que soit la nature des corps qui lui servent de véhicule, ou par l'intermédiaire desquels elle se transforme en travail. On devra donc arriver au même nombre, quel que soit le mode d'expérience qu'on adopte; or c'est ce qui paraît avoir lieu, comme nous le verrons bientôt. Voyons

d'abord comment on a pu découvrir cette dépendance entre la chaleur et le travail mécanique qu'elle produit, ou qui la produit.

Mongolfier, vers 1800, a le premier considéré la chaleur comme capable de se transformer en travail mécanique et réciproquement. Il imagina même un appareil, nommé *pyro-bélier*, dans lequel le mouvement était produit par une quantité constante d'air que l'on échauffait pour augmenter son élasticité, et à laquelle on restituait la chaleur perdue par son expansion, pour la faire agir de nouveau. Mais les idées de Mongolfier passèrent inaperçues; elles étaient en contradiction avec les doctrines régnantes, relatives à la manière d'agir de la vapeur dans les machines à feu. On croyait que l'effet mécanique était produit sans abaissement de température de la vapeur, parce que, d'après la loi de Watt, la quantité de chaleur absorbée par 1^{kil} d'eau à 0°, pour se transformer en vapeur, était la même, quelle que fût la pression (978).

En 1824, S. Carnot proposa une théorie, développée depuis par M. Clapeyron, dans laquelle il admettait que la chaleur ne faisait que traverser les machines à feu, sans éprouver de perte, la vapeur jouant simplement le rôle de véhicule. Ainsi, la quantité de chaleur contenue dans la vapeur entrant dans le corps de pompe, devait se retrouver en entier quand elle en sortait pour se précipiter dans l'atmosphère ou dans un condenseur. Cette théorie est aujourd'hui généralement abandonnée.

M. Séguin aîné, dépositaire des idées de Mongolfier, soutint le premier que l'effet mécanique est toujours la conséquence d'une dépense de chaleur, et que cet effet est proportionnel à la quantité qui disparaît dans le passage de la vapeur à travers la machine [1]. Il en est de même pour les gaz, quand on utilise leur dilatation par la chaleur, pour faire mouvoir des machines. Cette manière de voir a d'abord trouvé peu de partisans; mais bientôt, la science ayant fait de nouveaux progrès, il s'est manifesté un phénomène dont l'histoire de la science présente plusieurs exemples: divers physiciens, MM. Regnault, Hirn en France; MM. Joule, Thomson, Rankine, en Angleterre; MM. Mayer, Clausius, en Allemagne, ont adopté et développé à peu près en même temps des idées semblables, soit par le calcul, soit par l'expérience.

La nouvelle doctrine a été confirmée, entr'autres, par des expériences de M. Hirn [2]. Il fait remarquer d'abord que, suivant les idées de Carnot, si l'on recevait dans une masse d'eau à échauffer, la vapeur d'une machine sans condensation, toute la chaleur de la vapeur devrait se retrouver dans l'eau, et alors la force motrice produite par le passage de cette vapeur à travers la machine, serait obtenue sans aucune dépense de chaleur. L'axiome *ex nihilo nihil*, invoqué par M. Mayer, à propos de la question qui nous occupe, se trouverait donc ici en défaut. M. Hirn a fait ses expériences au moyen d'une machine à

[1] Il est évident qu'il ne s'agit pas ici de la perte de chaleur par communication aux corps environnants; celle-ci doit toujours être évitée avec soin.

[2] Cosmos, *Revue des progrès des sciences*, t. XVII, p. 647; et t. XVIII, p. 12.

vapeur à détente et à condensation munie de l'enveloppe de Watt, de la force de 106 chevaux. Il a trouvé que la vapeur en traversant cette machine, perdait à peu près le dixième de la chaleur qu'elle avait reçue de la chaudière, ou 24 calories environ par seconde. Cette chaleur disparue avait été transformée en travail mécanique.

On voit, d'après ce qui précède, qu'il faut tâcher, pour obtenir beaucoup de travail mécanique, de faire disparaître le plus possible de chaleur, c'est-à-dire de laisser à la vapeur, au moment où elle arrive au condenseur, une très faible pression. De là l'avantage de la détente. Cependant la chaleur utilisée, c'est-à-dire celle qui disparaît en se transformant en travail, est toujours une fraction très petite de celle que possède la vapeur à son entrée. D'après M. Regnault[1], dans une machine à détente sans condensation fonctionnant à 5 atmosphères, la vapeur possède à son entrée 653 calories ; elle en conserve 637 à sa sortie, c'est-à-dire qu'elle n'en a perdu que 16, ou $\frac{1}{40}$. Dans une machine à condensation, à 5 atmosphères, dont le condenseur présente une pression de 55 millimètres de mercure, la chaleur utilisée est de 34 unités, ou $\frac{1}{20}$ de la chaleur fournie par la chaudière. On voit, combien il serait avantageux de faire servir de nouveau cette vapeur, après lui avoir restitué le peu de chaleur perdue, au lieu de fournir de nouvelle vapeur. De là l'économie énorme réalisée dans les machines à vapeur régénérée, dont nous avons dit quelques mots dans le chapitre précédent (1008). Dans les machines à air chaud, dans lesquelles on fait déposer la chaleur qui reste au gaz sortant de l'appareil, sur des toiles métalliques qui servent ensuite à échauffer le nouvel air qui doit agir à son tour (1029), il y a de même une grande économie de chaleur.

1076. Evaluation de l'équivalent mécanique de la chaleur. — M. Joule a évalué l'équivalent mécanique de la chaleur par divers moyens, en renversant la question, c'est-à-dire en cherchant la quantité de chaleur produite par une certaine dépense de travail mécanique[2]. Le premier moyen est fondé sur la compression des gaz : on comprime de l'air à 22 atmosphères environ dans un récipient en cuivre, plongé, ainsi que la pompe foulante, dans l'eau d'un calorimètre. Après 300 coups de piston, on observe l'élévation de température de l'eau. Comme une partie de l'échauffement est produit par le frottement du piston, il faut évaluer l'effet dû à cette cause. Pour cela, on fait sortir l'air du récipient, puis on donne 300 nouveaux coups de piston, après avoir supprimé la communication de la pompe avec l'atmosphère. L'élévation de température est alors due au frottement seul, mais ce frottement n'est pas le même que dans le cas où le piston comprime de l'air. Des expériences directes ayant fait voir comment la chaleur produite varie quand on laisse de l'air sous le piston, après avoir supprimé la communication avec l'atmosphère et avec le

[1] *Comptes-rendus des séances de l'Académie des sciences* de Paris, t. XXXVI, p. 676.

[2] *Phil. magaz.*, mai 1845; et *Annales de chimie et de physique*, 3e s., t. XXXV, p. 121.

récipient, on peut faire une correction convenable. Le travail employé à comprimer le gaz se calcule au moyen de la loi de Mariotte, en supposant connues la course et la section du piston, ainsi que la pression initiale du gaz et sa pression finale. Par ce moyen, M. Joule a trouvé, pour l'équivalent mécanique de la chaleur, la valeur moyenne 444 kilogrammètres. Il faut que le gaz suive la loi de Mariotte, autrement il s'ajouterait un travail moléculaire au travail extérieur, et la quantité de chaleur dégagée serait plus grande. C'est ainsi que M. Regnault a trouvé, avec les gaz faciles à liquéfier, un équivalent dépassant de $\frac{1}{8}$ environ celui que lui ont donné les gaz permanents.

Dans une autre série d'expériences, M. Joule a fait passer de l'air comprimé, d'un récipient dans une cloche pleine d'eau. La température s'abaissa dans le récipient; et, du travail mécanique correspondant à la dilatation du gaz, il conclut, dans trois expériences distinctes, les valeurs 451^{km}, 447^{km} et 418^{km}.

Frottement des liquides. — M. Joule a encore procédé en partant de la chaleur dégagée dans le frottement des liquides. Il s'est servi de l'appareil déjà

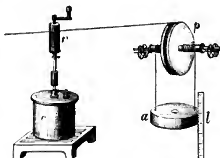


Fig. 801.



Fig. 802.

décrit (1075), représenté en coupe (*fig.* 768), et dont on voit l'extérieur en *c* (*fig.* 801). L'axe des palettes qui agitent l'eau est mis en mouvement par un cordon *rp* qui s'enroule sur le cylindre *r*, et sur une poulie *p*, mise elle-même en mouvement par le poids *a*. L'arbre de la poulie est supporté par un système de roues disposées comme celles de la machine d'Atwood. Un second cordon, placé à l'opposé du cordon *rp*, agit aussi sur le cylindre *r*; il s'enroule sur une poulie disposée comme la poulie *p* et sollicitée par un poids égal au poids *a*. Pour faire l'expérience, on montait les poids au moyen de la manivelle que porte le cylindre *r*, et après avoir noté la température du vase *c*, on les laissait descendre jusqu'au plancher du laboratoire. On répétait vingt fois cette opération, et l'on constatait l'élévation de température de l'eau. On évaluait la perte due au rayonnement, en observant la marche du thermomètre pendant un

temps égal à la durée de l'expérience. Il était ensuite facile de calculer le nombre de calories développées par l'agitation de l'eau. On calculait le travail des poids, en multipliant leur valeur par le chemin parcouru dans la descente vingt fois répétée. Pour obtenir le travail transmis à l'agitateur, il fallait retrancher la portion absorbée par les frottements. Pour cela, on séparait le cylindre *r*, de l'agitateur, et l'on réunissait les deux poulies au moyen d'un même cordon s'enroulant sur ce cylindre de manière que les poids se faisaient équilibre. On cherchait alors quel poids il fallait ajouter à l'une des masses *a*, pour qu'elle descendît avec un mouvement uniforme. Le travail de ce poids additionnel était évidemment égal au travail absorbé par le frottement. La valeur trouvée par ce moyen a été de 430^{km} avec l'eau, et de 432^{km}, avec le mercure.

Frottement des solides. — Une roue en fonte *a* (*fig.* 802), taillée en biseau sur ses bords, s'emboîte dans une seconde roue *rr*, pressée sur la première au moyen de la tige *b* et du levier L; le tout est plongé dans un vase de fonte plein de mercure. Le mouvement est imprimé à la roue *r* par le système de poulies décrit ci-dessus (*fig.* 801). L'équivalent obtenu a été 432^{km}.

Dans ces expériences, on conclut l'équivalent, de la quantité de chaleur produite par un travail donné. D'autres expériences ont été faites en cherchant, au contraire, directement l'effet mécanique produit par la disparition d'une certaine quantité de chaleur. M. Mayer, en faisant dilater un gaz, a trouvé la valeur 377^{km}, et M. Séguin a obtenu, au moyen de l'expansion de la vapeur, le nombre 449^{km}.

Elasticité des gaz. — M. Person a cherché la valeur de l'équivalent de la chaleur, au moyen du calcul suivant, en s'appuyant sur ce qu'une masse de gaz ne perd pas de chaleur en s'étendant dans le vide (1073) : considérons 1 mètre cube d'air à 0° et sous la pression de H kilogrammes par mètre carré. Soit p, c', et a le poids de cette masse d'air, sa chaleur spécifique *à volume constant*, et son coefficient de dilatation. Supposons qu'on échauffe ce gaz de 1°, sans lui permettre de se dilater; il faudra lui fournir une quantité de chaleur égale à pc', et sa pression deviendra $H(1+a)$. Si maintenant on établit une communication avec un espace vide égal à une fraction a du mètre cube, la pression redeviendra H, et la quantité de chaleur que contient le gaz n'aura pas changé. Supposons, en second lieu, qu'on échauffe de 1° le même volume d'air pris à 0° sous la pression H, en lui permettant, cette fois, de se dilater librement; il faudra lui fournir une quantité de chaleur égale à pc, c désignant la chaleur spécifique de l'air *à pression constante*. Le volume sera devenu $1+a$, à la pression H et à la température de 1°, comme dans le cas précédent, où la chaleur fournie était égale seulement à pc'. Dans le second cas, la dilatation a produit le travail aH, en agissant contre la pression H, tandis que dans le premier il n'y a pas eu de travail produit. La différence $pc - pc'$ représente donc la chaleur employée à accomplir le travail aH. Par conséquent, le travail produit par une unité de chaleur sera $aH : p(c - c')$.

En supposant que la pression de l'air soit égale à 76 centimètres, ce qui donne $H = 10334^k$, et $p = 1^k,293$; prenant $c' = 0,1686$, d'après Laplace, et $c = 0,2377$ d'après M. Regnault, on trouve 424 kilogrammètres pour le travail produit par une calorie. Malheureusement, nous savons combien la valeur de c' est incertaine.

M. Joule a aussi évalué l'équivalent mécanique de la chaleur au moyen de l'échauffement produit dans les actions électro-magnétiques ; mais ce moyen laisse beaucoup d'incertitudes; nous y reviendrons, du reste, pour comparer les effets calorifiques produits dans ces expériences, à certains effets électriques.

On voit que les nombres trouvés par les diverses méthodes que nous avons passées en revue, ne sont pas tout à fait égaux. Mais les différences peuvent être attribuées aux incertitudes des expériences; car une même méthode conduit à des résultats qui diffèrent souvent entre eux plus que les nombres obtenus par différentes méthodes; les résultats dépendant de la manière dont l'appareil utilise la chaleur ou le travail qui disparaissent, pour les transformer en travail ou en chaleur ; il peut y avoir aussi du travail intérieur inaperçu ; une partie de la chaleur se perd à l'extérieur, et il n'est pas facile d'en évaluer exactement la quantité. Il est même remarquable qu'on soit arrivé, par des méthodes aussi différentes, à des nombres qui diffèrent aussi peu. On peut donc regarder cette circonstance comme une preuve de l'existence de l'équivalent mécanique. Nous allons voir, du reste, qu'on peut la démontrer mathématiquement dans le cas des gaz, en parlant des lois expérimentales qui les concernent (1078).

1077. Conséquences. — La théorie mécanique de la chaleur conduit à modifier plusieurs des idées généralement admises sur la chaleur.

Quand un corps entre en fusion, il se fait un travail intérieur employé à séparer ses molécules, pour les rendre indépendantes les unes des autres. Ce travail est produit par de la chaleur *qui est détruite*, et c'est ce qui a fait imaginer l'hypothèse de la chaleur latente. La quantité de chaleur détruite est proportionnelle au coefficient d'élasticité, comme Person l'a reconnu dans le cas des métaux (934). Quand un liquide se solidifie, au contraire, le travail intérieur qui réunit ses molécules se transforme en chaleur; c'est pourquoi on voit apparaître une quantité de chaleur égale à celle qui avait disparu pendant la fusion. La chaleur dégagée pendant le travail moléculaire qui se fait spontanément sous certaines conditions, quand les corps changent de structure, comme le soufre mou, l'aragonite (1068), s'explique de la même manière.

Quand un liquide se vaporise, il y a un *travail intérieur* employé à détruire la cohésion moléculaire si bien mise en évidence par M. Donny (960), et un *travail extérieur* dépensé pour vaincre les obstacles qui peuvent s'opposer à l'expansion de la vapeur. Au contraire, quand on liquéfie une vapeur par compression, on fournit le travail *extérieur* par lequel on la comprime, auquel s'ajoute le travail *intérieur* de la cohésion qui rassemble les molécules ; ces

travaux disparaissent et se transforment en chaleur. Le travail intérieur ne peut s'évaluer dans l'état actuel de la science ; mais en ramenant les corps à leur état initial, comme l'a fait S. Carnot, il y a compensation entre les travaux moléculaires produits et dépensés, ainsi qu'entre les quantités de chaleur correspondantes, et il ne reste que les effets des travaux extérieurs.

Des deux capacités du gaz. — Dans le cas des gaz, remarquons que l'excès de la capacité calorifique à *pression constante* sur la capacité à *volume constant* (900) ne peut provenir que de la chaleur qui produit l'écartement des molécules, c'est-à-dire du travail intérieur qui correspond à cet écartement. Or, dans l'expérience de Clément Désormes (1044), la chaleur dégagée par la compression est en grande partie le produit du travail mécanique employé à comprimer le gaz : quand on laisse dilater le gaz comprimé, la chaleur qui disparaît est employée non seulement à produire l'écartement des molécules, mais encore à créer le travail nécessaire pour refouler l'air ambiant. La chaleur qui disparaît dépasse donc notablement celle que produirait l'écartement des molécules s'il n'y avait pas de travail extérieur produit. Il en est de même dans la propagation du son, et l'on voit pourquoi l'on ne peut pas déduire, des changements de température calculés dans ces diverses expériences, le rapport des capacités à pression constante et à volume constant ; on arriverait à un résultat beaucoup trop grand.

Une autre conséquence importante déduite par M. Clausius [1], c'est qu'on ne peut plus dire que lorsqu'un gaz éprouve des changements de pression et de température, la chaleur qu'il absorbe ou qu'il dégage dépend seulement de son état initial et de son état final. En effet, cette chaleur dépend aussi de la manière dont s'est effectué le passage d'un état à l'autre. On ne peut plus dire également que la chaleur contenue dans un corps reste la même quand, après avoir subi diverses modifications, il revient à son premier état. Il n'en serait ainsi qu'autant qu'il y aurait égalité entre le travail dépensé et le travail produit.

Voici comment M. Clausius le montre, dans le cas des gaz. Considérons un volume v de gaz sous la pression p et à la température t. Si v_0 et p_0 représentent son volume et sa pression à 0°, on aura, d'après la loi de Mariotte, et en appelant a le coefficient de dilatation du gaz,

$$[1] \qquad pv = p_0 v_0 (1 + at).$$

Représentons les volumes par des abcisses, et les pressions par des ordonnées, et soit $v = \overline{oa'}$, et $p = am$ (*fig.* 803).

1° Supposons que le gaz se dilate par sa propre expansion sans changer de température, de la chaleur lui étant fournie pour remplacer celle qui se change en travail moléculaire ; t étant constant, la pression et le volume varient suivant la loi de Mariotte, et l'équation [1] devient $pv = constante$, qui représente une

[1] *Ann. de Pogg.*, 1850 ; et *Annales de chimie et de physique*, 3e s., t. XXXV, p. 482.

hyperbole équilatère dont les asymptotes sont les axes des coordonnées. Si donc *ob* et *bn* représentent le volume et la pression finale, l'arc *mn* sera un arc d'hyperbole, et le travail accompli pour écarter les molécules sera représenté par l'aire *mabn*. En effet, pendant chaque instant infiniment petit, le travail est égal à l'augmentation du volume, *aα*, multipliée par la force, ou par la pression *ma*, c'est-à-dire à l'aire *mα*.

2° Supposons que le gaz continue à se dilater *sans recevoir de chaleur* extérieure; il se refroidira, son volume deviendra $\overline{oc}$, sa pression *cr*, et si *nr* est la courbe qui représente les changements de pression, le travail accompli sera représenté par l'aire *nbcr*, et aura été produit par la chaleur qui correspond à l'abaissement de température.

3° Le gaz refroidi est comprimé, et l'on enlève au fur et à mesure la chaleur dégagée, de manière que l'on ait encore $pv =$ *constante*. Le volume devient *od*, la pression *ds*, et le travail accompli est représenté par l'aire hyperbolique *sdcr*.

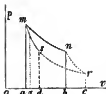


Fig. 803.

4° Enfin, on continue à comprimer le gaz de manière à le ramener à son volume primitif, *sans lui enlever la chaleur dégagée*; il s'échauffe, et on suppose que l'opération précédente l'ait placé dans un état tel que la température revienne à ce qu'elle était d'abord, de manière que le gaz se trouve ramené à son état initial. Le travail dépensé sera représenté par l'aire *mads*. Or, on voit que la somme des travaux dépensés dans les deux premières opérations, dépasse celle des travaux dépensés dans les deux dernières de la quantité représentée par l'aire *msrn*. La quantité de chaleur fournie dans la première, dépasse donc aussi la quantité enlevée pendant la troisième, d'une quantité proportionnelle à la même aire. Pendant le retour à l'état initial, il y a donc eu plus de chaleur absorbée que de chaleur dégagée, et l'excès de chaleur absorbée s'est transformé en travail extérieur.

1078. Démonstration mathématique de l'équivalent. — Le résultat qui précède a été obtenu en partant du principe de l'équipollence de la chaleur et du travail mécanique. M. Bourget arrive aux mêmes conséquences, et prouve en même temps le principe de l'équivalent mécanique de la chaleur, sans s'appuyer sur aucune hypothèse.

Soient v, t, p le volume, la température et la pression d'un gaz occupant 1 mètre cube à la pression $0^m,76 = H$ et à la température de $0°$. On aura

$$[1] \qquad pv = H\,(1 + at)$$

Prenons $oa = v$ et $aA = p$ (*fig.* 804). La position du point A représentera

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. LVI, p. 257.

l'état du gaz, et si la température et la pression de ce gaz changent, ce point changera de position et formera une courbe telle que An. Si cette courbe revient au point de départ, elle forme un *circuit fermé*. Cela posé, nous allons considérer d'abord un cas particulier.

Supposons que les pressions et les températures varient de telle manière que les états successifs du gaz soient représentés par les points d'un circuit fermé rectangulaire parcouru dans le sens ADBCA (*fig.* 804), et cherchons la quantité de chaleur dépensée dans ce parcours, pour la comparer au travail effectué. Quand le gaz passe de l'état A à l'état D, sa pression augmente de AD sans changement de volume, il a donc fallu qu'il y ait échauffement. Si p' est la nouvelle pression aD, la température t_1 sera donnée par la relation

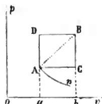


Fig. 804.

$$[2] \qquad p'v = \mathrm{H}\,(1 + at_1),$$

qui donne $\quad (p' - p)\, v = \mathrm{H}a\,(t - t_1), \qquad [3]$

en la combinant avec [1]; et la quantité de chaleur dépensée pour produire l'augmentation de pression $p' - p$ sera, en désignant par D le poids de 1 mètre cube de gaz à 0°, et par c' la chaleur spécifique *à volume constant*,

$$q = \mathrm{D}c'\,(t_1 - t), \qquad \text{ou} \qquad q = \frac{\mathrm{D}}{\mathrm{H}a}\, c'v\,(p' - p),$$

en remplaçant $t - t_1$ par sa valeur tirée de [3].

Quand le gaz passe de l'état D à l'état B, il se dilate de DB, sans changer de pression, son volume devient v', et sa température t' est donnée par la relation

$$[4] \qquad p'v' = \mathrm{H}\,(1 + at'); \qquad \text{d'où} \qquad p'\,(v' - v) = \mathrm{H}a\,(t' - t_1)$$

en la combinant avec [2]. En désignant par c la capacité du gaz *à pression constante*, la quantité de chaleur dépensée sera

$$q_1 = \mathrm{D}c\,(t' - t) = \frac{\mathrm{D}}{\mathrm{H}a}\, cp'\,(v' - v).$$

En passant de l'état B à l'état C le gaz se refroidit sans changer de volume, sa température t_2 est donnée par la relation $pv' = \mathrm{H}\,(1 + at_2)$, qui, combinée avec [4], donne $(p' - p)\,v' = \mathrm{H}a\,(t' - t_2)$, et la chaleur *recueillie* est

$$q' = \mathrm{D}c'\,(t' - t_2) = \frac{\mathrm{D}}{\mathrm{H}a}\, c'v'\,(p' - p).$$

Enfin quand le gaz passe de l'état C à l'état primitif A, il se refroidit sans

changer de pression, sa température redevient t, et la formule $pv = \text{H}\ (1 + at)$ combinée avec $pv' = \text{H}\,(1 + at_2)$, donne $p\,(v' - v) = \text{H}a\,(t_2 - t)$, d'où

$$q'_1 = \text{D}c\,(t_2 - t) = \frac{\text{D}}{\text{H}a}\,cp\,(v' - v).$$

La dépense de chaleur sera donc $\text{Q} = q + q_1$, la chaleur recueillie $\text{Q}' = q' + q'_1$, et la dépense définitive

$$\text{Q} - \text{Q}' = \frac{\text{D}}{\text{H}a}\,(c - c')\,(p' - p)\,(v' - v).$$

La quantité $\text{Q} - \text{Q}'$ ne pouvant être nulle, on voit que *lorsqu'un gaz change d'état pour revenir à son état initial, il y a toujours une certaine quantité de chaleur anéantie, représentée par l'aire du rectangle* ADBC.

Si l'on rapproche le point B du point A jusqu'à ce que la distance devienne infiniment petite, la quantité $\text{Q} - \text{Q}'$ s'approche de la limite *zéro*; d'où l'on conclut que, si l'on passe d'un état A à un autre B infiniment voisin, la quantité infiniment petite de chaleur $\text{Q} - \text{Q}'$ est la même, soit que l'on suive la route ADB, soit que l'on suive la ligne droite AB. Il résulte de là qu'on peut remplacer un élément AB de courbe quelconque par ses deux projections DA, DB sur des parallèles aux axes, et considérer les courbes comme composées d'éléments rectilignes parallèles à ces axes, ce qui permet d'étendre l'énoncé qui précède au cas d'un circuit fermé de forme quelconque.

Cherchons maintenant le travail moteur développé pendant que le point A parcourt le rectangle ADBC. Le travail *moteur* le long du chemin ADB est $\text{T} = p'\,(v' - v)$, et le travail *résistant* le long du chemin BCA, $\text{T}' = p\,(v' - v)$. Le travail moteur du gaz le long du circuit fermé sera donc

$$\text{T} - \text{T}' = (p' - p)\,(v' - v)$$

c'est-à-dire qu'il est représenté par l'aire du rectangle ADBC. Si l'on compare la valeur de $\text{T} - \text{T}'$ à celle de $\text{Q} - \text{Q}'$, on trouve

$$\text{Q} - \text{Q}' = \frac{\text{D}\,(c' - c)}{\text{H}a}\,(\text{T} - \text{T}'), \qquad \text{ou} \qquad \text{Q} - \text{Q}' = \frac{1}{\text{E}}\,(\text{T} - \text{T}'),$$

en représentant par $1 : \text{E}$ le coefficient constant de $\text{T} - \text{T}'$. On voit donc que *la quantité de chaleur anéantie est proportionnelle au travail moteur, et réciproquement*. Ce résultat peut s'étendre au cas d'un circuit fermé de forme quelconque, car, d'après la définition, le travail suivant AB est égal au travail suivant sa projection sur une parallèle à l'un des axes.

Si nous faisons $\text{Q} - \text{Q}' = 1$, c'est-à-dire s'il y a une *calorie* d'anéantie, on a $\text{T} - \text{T}' = \text{E}$. Nous voyons donc que *tout se passe comme si la chaleur se*

transformait en travail mécanique, à raison de E kilogrammètres par chaque calorie perdue.

Si le circuit était parcouru en sens inverse, les valeurs de T—T′ et de Q—Q′ seraient négatives ; il y aurait du travail anéanti, et de la chaleur engendrée, et l'énoncé précédent serait encore vrai.

1079. Remarques. — Nous avons posé $E = \frac{Ha}{D(c-c')}$ [1]. Si nous prenons $H = 10333^k$, $a = 0{,}003665$, $D = 1{,}293$, $c = 0{,}2377$, et $c : c' = 1{,}41$ d'après les expériences de Masson, nous aurons en nombre rond $E = 424^{km}$. C'est le nombre trouvé par Person, mais, comme nous l'avons déjà dit, la valeur de $c : c'$ est très incertaine.

La démonstration de M. Bourget conduit à des conséquences importantes. On voit que s'il y a réellement un équivalent de la chaleur, la valeur de E doit être mathématiquement constante, et comme a est sensiblement le même pour tous les gaz, $D(c-c')$ doit aussi être le même ; d'où l'on conclut que les différences des deux chaleurs spécifiques rapportées au poids, doivent être en raison inverse des densités ; ou bien, en rapportant les capacités aux volumes, que la différence doit être la même pour tous les gaz.

Comme c a la même valeur pour les gaz simples permanents, et que l'on a $D(c-c') = Dc\left(1 - \frac{c'}{c}\right) = constante$, on voit que $c' : c$ doit être constant pour un même gaz, quelles que soient la pression et la température. Si donc on pouvait vérifier cette conséquence par l'expérience, on aurait ainsi une vérification importante de l'existence de l'équivalent mécanique. Le calcul analytique appliqué à cette question a conduit aussi M. Bourget à l'énoncé de la loi trouvée par Dulong sur l'égalité de la chaleur dégagée par la compression des différents gaz (1045). Il résulte aussi de ce calcul que, pour un même gaz, la quantité de chaleur dégagée est proportionnelle à la pression d'où l'on part.

Tous ces résultats avaient été déduits par M. Clausius, comme conséquences de l'existence de l'équivalent mécanique. M. Bourget y arrive d'une manière toute différente, en montrant qu'elles doivent avoir lieu s'il y a réellement un équivalent.

1080. Théorie mécanique de la chaleur. — Les transformations de la chaleur en travail, et du travail en chaleur, sont bien en harmonie avec le système des ondulations, et jettent un jour inattendu sur les différents moyens d'engendrer de la chaleur, et sur sa manière d'être dans les corps. La *température* n'est alors que l'état vibratoire particulier des molécules ou groupes moléculaires. Pour faire vibrer ainsi les molécules, il faut dépenser, et leur transmettre, une certaine quantité de force vive. C'est ainsi que, par le frottement, le choc, on ébranle les molécules, et ce mouvement qui se communique à l'éther et se propage au dehors par son intermédiaire, constitue la chaleur. Les choses se passent comme lorsqu'on fait vibrer une cloche, une barre, une

corde, par le choc, le frottement transversal ou longitudinal; on dépense du travail mécanique qui se retrouve dans le corps vibrant. Les vibrations calorifiques peuvent se transformer en travail extérieur; ce travail constitue d'abord la dilatation, mais s'il y a des obstacles qui s'opposent à cette dilatation, le mouvement vibratoire doit être affaibli dans une bien plus grande proportion, c'est-à-dire qu'il y aura plus de chaleur dépensée. Il en est de même des vibrations sonores, qui peuvent projeter du sable, des corps très mobiles, en perdant de leur intensité par la communication de leur force vive. — Un corps se refroidit en faisant participer à son mouvement vibratoire, qui s'affaiblit alors, soit les corps en contact soit l'éther environnant. C'est ainsi qu'un diapason communique ses vibrations au corps élastique sur lequel on l'appuie, mais en perdant de son intensité vibratoire, car il cesse de vibrer beaucoup plus tôt que lorsqu'il n'est pas appuyé. On conçoit bien aussi comment l'équilibre de température s'établit entre plusieurs corps.

La *température* n'étant autre chose que l'état vibratoire des molécules, il faut dépenser pour produire cet état, une certaine quantité de travail qui est représentée par la chaleur fournie, c'est-à-dire par la chaleur spécifique, et qui varie suivant la nature et l'arrangement des molécules; de même que l'on fait vibrer les corps, en dépensant plus ou moins de travail mécanique, suivant leur densité, leur structure et leur élasticité. L'égalité de capacité des atomes simples montre qu'il faut fournir le même travail pour les ébranler au même degré; mais comme il y a un certain travail employé à écarter les molécules et à les déranger de leurs positions relatives, on conçoit pourquoi l'égalité ne se vérifie pas rigoureusement; et l'on a ainsi une explication naturelle de la belle loi des capacités des atomes simples ou composés, et des diverses interprétations qui en ont été données.

La chaleur latente qui disparaît dans les changements d'état, se conçoit tout aussi facilement; il faut, pour séparer les molécules et vaincre la cohésion, dépenser une certaine quantité de force vive, qui est ordinairement fournie par de la chaleur extérieure, mais qui peut l'être aussi par des chocs réitérés (1038). Quant à concevoir comment des vibrations peuvent disjoindre les molécules, il suffit de se rappeler le phénomène de la rupture d'une verge de verre, quand on la fait fortement vibrer dans le sens de sa longueur (I, 640).

On conçoit que les actions chimiques soient provoquées par les mouvements vibratoires communiqués par la chaleur, par la lumière, ou dans certains cas, par des chocs, et que les affinités mettant ensuite les molécules en mouvement il en résulte de nouvelles vibrations qui se communiquent à l'éther; ce qui explique la chaleur dégagée dans les actions chimiques. Nous aurons à revenir sur cette question en parlant des effets chimiques de la lumière.

On peut conclure de ce qui précède que *la chaleur est un mouvement*, provoqué par différentes causes dans les molécules des corps, et se propageant de proche en proche dans un même corps ou dans des corps contigus, et pouvant ensuite

se communiquer à l'éther qui remplit les pores de la matière et de celui-ci à l'éther extérieur, de manière à constituer la chaleur rayonnante, dont les analogies avec la lumière ont été développées précédemment (745).

§ 2. — SOURCES PHYSIOLOGIQUES DE CHALEUR.

1081. CHALEUR ANIMALE. — Les animaux dégagent continuellement de la chaleur pendant leur vie. Chez les animaux à *sang chaud*, qui sont les mammifères et les oiseaux, cette chaleur compense à chaque instant les pertes extérieures, de manière que leur température reste sensiblement constante. Chez les autres, dits à *sang froid*, la température n'a plus rien de fixe, elle suit les variations du milieu ambiant. Cependant ces animaux engendrent de la chaleur, car leur température dépasse presque toujours de quelques degrés celle du fluide dans lequel ils vivent; seulement, la chaleur se produit si lentement qu'elle est enlevée à chaque instant par l'action des causes extérieures. Ce qui distingue réellement les animaux à sang chaud des animaux à sang froid, c'est que la température des premiers est sensiblement constante, tandis que celle des autres peut éprouver des variations considérables, sans que leur existence soit compromise.

1082. Température des animaux. — Pour mesurer la température d'un mammifère, on introduit un thermomètre très sensible dans une partie de son corps assez profonde pour ne pas subir l'influence du milieu ambiant. J. Davy plaçait l'instrument sous la langue de l'animal. Cependant, là on trouve encore une température un peu plus faible que dans les régions les plus profondes, surtout quand l'air est froid. Ce n'est que pour ces régions profondes qu'on peut dire que la température des animaux à sang chaud est constante; la température des régions superficielles, surtout de celles qui sont en partie isolées, comme les pieds, les mains, le nez, les oreilles, peut être accidentellement beaucoup plus basse. Chacun a pu en faire l'observation quand il fait très froid.

Pour explorer les parties profondes des animaux vivants, sans pratiquer des incisions qui produiraient une irritation capable de modifier la température, MM. Becquerel et Breschet[1] ont employé deux systèmes d'aiguilles très fines formées chacune d'une partie en cuivre et d'une partie en acier soudées bout à bout. On introduit l'une de ces aiguilles *ab* (*fig.* 805) par la pointe d'acier *b*, dans l'organe que l'on veut explorer, de manière que la soudure soit au point dont on veut obtenir la température. L'extrémité *b* est mise en communication avec l'extrémité en acier de l'autre aiguille *ee'*, au moyen d'un fil de même

[1] *Traité de phys. dans ses rapp. avec la chimie et les sc. naturelles*, par M. Becquerel, t. II.

substance *be*. Enfin, les extrémités en cuivre des deux aiguilles sont mises en communication avec les deux bouts du fil d'un *rhéomètre multiplicateur* R. La déviation de l'aiguille aimantée de cet instrument fait connaître la différence de température des soudures des aiguilles *ab*, *ee'*. Le rhéomètre doit être assez sensible pour donner une déviation de 1° quand la différence de température des soudures est de 0°,1. La soudure *e'* de l'aiguille *ee'* est maintenue à une température constante, soit dans de la glace fondante, soit dans la bouche de l'expérimentateur, soit encore dans l'étuve de M. Sorel, AB (883), dont la température est réglée de manière que la différence entre les températures des soudures des deux aiguilles soit assez petite pour que les déviations du rhéomètre ne dépassent pas 20 degrés. Du reste, l'irritation que produit la présence de l'aiguille ne semble pas modifier la température de l'organe ; car, si l'on emploie des aiguilles de différente grosseur, les résultats restent les mêmes, et cependant l'irritation doit être différente.

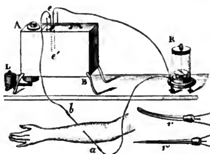


Fig. 805.

Il y a des organes qu'on ne peut perforer sans danger : par exemple, les intestins, l'estomac. Les deux parties de l'aiguille sont alors appliquées l'une contre l'autre, comme on le voit en *r* et *r'* (*fig.* 805), et soudées par l'une des extrémités sur une longueur de 2 ou 3^{mm}. Elles sont séparées partout ailleurs par une lame mince d'une substance non conductrice de l'électricité. L'aiguille forme alors une espèce de sonde, *r*, *r'*, à laquelle on donne une forme appropriée à la cavité que l'on veut explorer.

L'usage des aiguilles thermo-électriques exige quelques précautions : il faut éviter le refroidissement des parties de ces aiguilles qui sont exposées à l'air ; pour cela, on les enveloppe avec de la laine. Il faut aussi que la longueur totale des fils qui composent le circuit reste constante dans une même série d'expériences, sans cela des déviations égales ne correspondraient pas à des différences égales de température entre les soudures.

1083. Températures comparées dans un même individu. — Il résulte des expériences de MM. Becquerel et Breschet, que les muscles de l'homme présentent 1°,25 à 2°,25 de plus que le tissu cellulaire sous-cutané. Les contractions des muscles élèvent leur température : si l'on plie plusieurs fois de suite l'avant-bras, pendant que la soudure de l'une des aiguilles se trouve plongée dans le muscle biceps, l'aiguille du rhéomètre indique un accroissement de température qui, au bout de 5 minutes, peut aller à 5°. L'agitation et tout ce qui détermine un afflux de sang élève la température.

Au contraire, la compression d'une artère est suivie d'un refroidissement dans les muscles où ce vaisseau se ramifie.

Le sang artériel est plus chaud que le sang veineux. J. Davy avait trouvé une différence de 0°,74; il engageait le réservoir de petits thermomètres dans la carotide et la jugulaire de divers animaux. M. Becquerel, en se servant d'aiguilles en forme de sonde à pointe très fine qu'il enfonçait dans les vaisseaux, a trouvé, sur des chiens, une différence de 1°,01 en moyenne entre le sang artériel de l'aorte et le sang veineux de la veine cave ascendante. Ces vaisseaux étaient mis à découvert en ouvrant la poitrine; ce qui faisait que les poumons ne fonctionnaient que très imparfaitement. A mesure qu'on s'éloigne du cœur, on trouve une petite diminution de température de quelques dixièmes de degré, tant dans les veines que dans les artères.

L'état de fièvre, chez l'homme, est accompagné d'une élévation de température qui peut aller à 3°. L'état de paralysie d'un membre ne paraît pas modifier sa température.

Influence de la température ambiante. — La température de l'homme, observée dans les muscles, est de 37° environ; elle ne varie que de 1° environ, quand on passe d'un individu à un autre. C'est ce qui résulte d'observations faites dans toutes les parties du monde, par J. Davy. Il a constaté aussi que la température d'un même individu peut s'élever de 1° quand il se transporte dans des pays où la température est plus élevée que celle de son corps. Cet effet paraît plus sensible chez les Européens que chez les habitants des pays chauds : des enfants nés à Colombo ont donné à J. Davy 38°,9, tandis que des Hottentots ne donnaient que 35°,8.

Divers observateurs ont pu séjourner pendant 10 à 15 minutes dans des étuves à température élevée. Dobson a pu supporter ainsi 99°, Berger 109°, Blagden 127°,67, Tillot et Duhamel 128°,75. Le pouls battait alors 164 fois par minute au lieu de 60, et la température du corps s'élevait de 4 ou 5°. Un pareil excès ne peut être supporté que pendant peu de temps, car des animaux soumis aux mêmes expériences périrent dès que la température eut dépassé notablement celle qu'ils possédaient habituellement.

Franklin a expliqué la résistance à l'échauffement, des animaux à sang chaud, par le froid qu'engendre l'évaporation qui a lieu à la surface de leur peau. En effet, les observateurs qui se sont soumis à des températures très élevées ont toujours eu soin de dessécher l'air, pour que la transpiration fût très active, et Delaroche, ayant renfermé des animaux dans des étuves saturées d'humidité, les a vu périr promptement, quoique la température de l'étuve dépassât très peu celle de leur corps.

Du reste, la résistance à l'échauffement n'est peut-être pas aussi prononcée qu'on le croit; car, dans certaines expériences, la température du corps s'est élevée de quelques degrés, quoiqu'on ne les ait pas prolongées suffisamment pour qu'une masse aussi grande se mît en équilibre avec la température ambiante. La résistance au refroidissement est plus prononcée; ce qui s'explique

facilement, puisque le corps renferme une source permanente de chaleur. Cependant, on ne peut résister aux froids intenses des régions boréales qu'en augmentant la chaleur des muscles au moyen d'un exercice violent. Si l'on reste immobile, l'équilibre tend à s'établir, et un engourdissement suivi de torpeur amène insensiblement la mort, surtout chez les enfants et les vieillards.

1084. Température des divers animaux. — Voici quelques résultats généraux trouvés par J. Davy. La température des mammiféres varie, en général, de 37° à 40°. Le pangolin a donné cependant 26°,7 seulement, l'air étant à 27°.

Les oiseaux, dont le systéme respiratoire est si développé, ont donné des résultats généralement compris entre 38° et 43°,9.

Il y a des animaux à sang chaud dont la température ne peut se maintenir qu'à 12° à 15° au-dessus de celle de l'air ; pendant l'hiver, cette température s'abaisse notablement; ils tombent dans l'engourdissement, et restent dans un état de sommeil léthargique. On les nomme *animaux hibernants*; ils forment pour ainsi dire le passage des animaux à sang chaud aux animaux à sang froid. Les mammifères et les oiseaux, quand ils sont très jeunes, produisent aussi assez peu de chaleur pour se refroidir facilement ; c'est pourquoi, quand ils sont privés des soins de leur mére, dont la chaleur les préserve du refroidissement, ils ne tardent pas à périr, à moins que la température de l'air ne soit élevée.

Dans les animaux à sang froid, la température n'est plus constante; elle dépend de celle du milieu ambiant. Les reptiles donnent le plus souvent quelques degrés de plus que l'air extérieur. Les poissons peuvent posséder 1° de plus que l'eau qui les environne. La bonite présente une exception remarquable: chez ce poisson, la température des muscles profonds s'est trouvée de 37°,2, l'eau de la mer n'étant qu'à 27°,2.

On a fait peu d'observations sur les mollusques et les crustacés. L'huître, l'écrevisse et le crabe ont donné à J. Davy la même température que l'eau. Les insectes dégagent au contraire assez de chaleur pour se maintenir souvent au-dessus de la température extérieure. Les essaims d'abeilles peuvent faire monter le thermomètre à 49° ; et cet instrument s'est quelquefois élevé à 36° dans des ruches, quand la température extérieure était trés basse. J. Davy a trouvé 22°,5 sur un grillon, pendant que l'air n'était qu'à 16°,7. Le sphynx du caille-lait est souvent chaud à la main; Dugès a trouvé sa température supérieure de 8° à celle de l'air extérieur, qui était de 28°. Nous avons dit (711) par quel moyen Melloni a pu reconnaître que les insectes dégagent de la chaleur.

1085. Mesure de la chaleur animale. — Les recherches qui ont été faites pour évaluer la quantité de chaleur dégagée par les animaux, ont toujours eu pour objet principal de la comparer à la quantité d'oxygéne absorbée dans l'acte de la respiration, afin de contrôler les théories par lesquelles on a cherché à expliquer la chaleur animale.

C'est à Lavoisier et Laplace que sont dues les premières expériences sur ce sujet. Ils se servaient de leur calorimètre de glace, dans lequel ils plaçaient une boîte en métal contenant l'animal soumis à l'expérience. De l'air à 0° arrivait continuellement dans la boîte, et les gaz provenant de la respiration étaient recueillis pour être analysés. — Crawfort et Black ont fait des expériences analogues, mais elles sont regardées comme peu exactes.

En 1822, M. Despretz, au moyen de l'appareil que nous avons déjà décrit (1061), a mesuré la chaleur dégagée par différents animaux[1]. L'animal était renfermé dans une caisse en cuivre, plongée dans l'eau du calorimètre et fermée par un couvercle dont les bords rabattus s'enfonçaient dans une rigole pleine de mercure. Des baguettes d'osier empêchaient qu'il n'y eût contact entre les parois de cette caisse et le corps de l'animal. L'air était fourni par un gazomètre gradué, et les gaz provenant de la respiration étaient reçus dans un autre gazomètre, où ils étaient séparés de l'eau par un flotteur en fer-blanc, pour éviter l'absorption d'un peu d'acide carbonique, par l'eau; plus tard, M. Despretz a recueilli ces gaz dans un gazomètre à mercure. Ces expériences remarquables ont été faites sur différents animaux : lapins, cochons d'Inde, chiens, chats, pigeons, canards, grand-duc, chouettes, pies, poules, goëlands, buses.

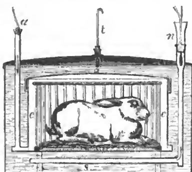


Fig. 806.

Vers la même époque, Dulong faisait des recherches sur le même sujet[2]. La *fig.* 806 représente une coupe de son calorimètre : dans une caisse ovale remplie d'eau est plongée une boîte en cuivre mince *cc*, renfermant l'animal, qu'une cage légère en osier sépare des parois. La boîte porte un couvercle fermant au moyen du mercure. L'air entre dans la caisse par le tube *a*; il est chassé d'un gazomètre fixe, par de l'eau qu'on fait arriver avec une vitesse constante dans la cuve qui le contient. Les produits de la combustion s'échappent par le tube *n*, après avoir parcouru un serpentin horizontal *s*. Ils sont reçus dans un autre gazomètre fixe, dans lequel le niveau de l'eau baisse uniformément, cette eau s'écoulant par un siphon à flotteur. Un disque en liége, garni sur son contour d'un taffetas imperméable très flexible, sert à préserver les gaz du contact de l'eau. Les expériences ont été faites sur des chiens, chats, cabiais, lapins, pigeons, crécerelle.

[1] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. XXVI, p. 337.

[2] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. I, p. 440.

1086. Origine de la chaleur animale. — On entrevoit tout d'abord que la chaleur animale est due aux actions chimiques très nombreuses qui se produisent pendant la vie. Longtemps, on a admis que les poumons étaient le foyer unique de la chaleur dégagée, et qu'elle se produisait toute entière dans l'acte de la respiration ; le sang étant ensuite chargé de la transporter dans toutes les parties du corps.

Les anciens philosophes considéraient la respiration comme destinée seulement à rafraîchir le sang par une sorte de ventilation. Crawfort paraît avoir admis le premier, en s'appuyant sur la théorie du phlogistique, que cette fonction est la cause de la chaleur animale ; mais ce n'est qu'après que Lavoisier eut expliqué la combustion, qu'on put se faire des idées nettes à ce sujet. Cet illustre chimiste établit alors une théorie de la calorification qui a pendant longtemps réuni tous les suffrages. Dans cette théorie, on suppose que l'oxygène de l'air se combine dans les poumons avec le carbone et l'hydrogène du sang. Lavoisier et Laplace avaient, en effet, trouvé que la chaleur dégagée dans la formation de l'acide carbonique exhalé, était à peu près égale à celle qui était dégagée par l'animal. Mais l'acide carbonique avait été fourni par un animal, et la chaleur dégagée, par un autre. M. Despretz et Dulong, chacun de leur côté, avaient trouvé que la chaleur produite par la formation de l'acide carbonique, jointe à celle que le reste d'oxygène employé eût dégagée en se combinant avec de l'hydrogène, ne représentait que 75 à 90 pour cent de la chaleur animale. Mais, en calculant les résultats au moyen du pouvoir calorifique plus exact de l'hydrogène, trouvé depuis par Dulong, on reconnaît que la chaleur fournie par la combinaison de l'oxygène *dépasse notablement* la quantité de chaleur dégagée par l'animal.

Loin d'admettre un pouvoir calorifique occulte venant ajouter ses effets à ceux de la respiration, il faut donc chercher à expliquer ce que devient l'excès de chaleur qui n'est pas communiqué au calorimètre. M. Dumas pense que, *pendant le repos*, la quantité de chaleur que l'animal perd au dehors est moindre que celle qu'il produit; l'excès se dissimule, reste à l'état latent, pour se manifester pendant le travail musculaire; de sorte que, dans l'état de mouvement, la chaleur qui se répand au dehors est en plus grande quantité que celle que produit la respiration, quoique celle-ci se trouve plus abondante, à cause de l'activité momentanée que prennent la respiration et la circulation pendant le mouvement.

Nouvelle explication de la chaleur animale. — La théorie précédente a été profondément modifiée. On n'admet plus qu'il se fait une combustion dans les poumons ; on a reconnu qu'il y a simplement échange de gaz à travers les parois des cellules pulmonaires, suivant le mode que nous avons expliqué précédemment (I, 381). Cet échange se fait très rapidement, parce que les membranes que les gaz doivent traverser sont excessivement minces et présentent une grande étendue, car, chez l'homme, la surface totale des cellules pulmonaires est égale à 30 fois environ la surface extérieure du corps. Pour

établir cette théorie, qui a été développée principalement par le Dr Edwards, on prouve d'abord que l'acide carbonique existe tout formé dans le sang veineux. En effet, on peut l'en extraire facilement ; et, de plus, les animaux qui peuvent vivre quelque temps dans l'azote ou l'hydrogène, exhalent autant d'acide carbonique que s'ils respiraient dans l'air. En partant de là, Desgranges a fait voir que c'est dans les dernières ramifications des vaisseaux sanguins que l'oxygène dissous dans le sang artériel agit chimiquement ; le sang veineux est chargé de transporter les fluides qui doivent être exhalés, dans les poumons où ils sont rejetés au dehors, pour être remplacés par l'oxygène qui pénètre dans le sang et le régénère ; et, en effet, M. Magnus a trouvé de l'oxygène dans le sang artériel, en même temps que de l'acide carbonique dans le sang veineux. La chaleur animale prend donc naissance dans toutes les parties du corps ; mais elle est toujours en rapport avec la quantité d'oxygène absorbée dans les organes respiratoires, puisque c'est, en définitive, cet oxygène qui produit des actions chimiques partout où le sang circule.

Maintenant, en quoi consistent ces actions chimiques ? Il est beaucoup plus difficile de répondre à cette question qu'on ne l'avait cru d'abord. En effet, suivant la remarque de M. Regnault[1], le phénomène est très complexe : les substances que contient le sang veineux et qui doivent se combiner avec l'oxygène dans les vaisseaux capillaires qui pénètrent dans la profondeur des organes, proviennent des aliments transformés dans l'acte de la digestion. Ces substances sont formées en général de carbone, d'hydrogène, d'azote et d'oxygène. Quand certains de ces éléments se combinent avec l'oxygène, la chaleur est bien différente de celle qui se dégagerait dans la combinaison du carbone et de l'hydrogène *libres* (1067). De plus, ces substances ne sont pas toutes brûlées ; une partie se transforme en d'autres produits, les uns destinés à constituer les matériaux du corps, les autres destinés à fournir aux sécrétions de divers organes, ou à être rejetés au dehors sous différentes formes. Toutes ces réactions sont accompagnées d'absorption ou de dégagement de chaleur, et il est facile de concevoir que le résultat final soit une quantité de chaleur supérieure à celle que l'oxygène absorbé dégagerait en brûlant du carbone et de l'hydrogène supposés libres. D'après les expériences de MM. Regnault et Reiset, il y a d'autant plus d'oxygène transformé en acide carbonique que le régime de l'animal est plus exclusivement végétal.

Dans tous les cas, la quantité de chaleur dégagée par un animal croît avec la quantité d'oxygène absorbée. Legallois, ayant plongé des animaux dans des atmosphères artificielles renfermant proportionnellement moins d'oxygène que l'air, a toujours vu que ces animaux se refroidissaient notablement, et d'autant plus qu'ils absorbaient moins d'oxygène. Il résulte des expériences de MM. Regnault et Reiset[2], que les animaux les plus petits absorbent, à poids

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XXVI, p. 513.
[2] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XXVI, p. 505.

égal, plus d'oxygène que les plus gros appartenant à la même classe. Par exemple, le moineau et le verdier en absorbent 10 fois plus que la poule ; c'est que les causes de refroidissement agissent bien plus efficacement sur les animaux qui présentent le moins de masse. Les insectes consomment, à poids égal, autant d'oxygène que les mammifères de petite taille, comme le chien, le lapin..... Si leur température ne s'élève pas notablement au-dessus de celle de l'air, cela tient au refroidissement rapide qui résulte de leur très faible masse.

Nous devons ajouter que les actions chimiques qui donnent naissance à la chaleur animale n'ont lieu que sous l'influence du système nerveux. Ce n'est donc pas sans motif qu'on a pu dire que la caloricité dépend de l'influence nerveuse ; mais il faut bien remarquer qu'elle n'agit qu'en provoquant les actions chimiques sans lesquelles il n'y aurait pas de chaleur produite. Les expériences faites par M. Brodie et par M. Chossat[1], sur des animaux décapités chez lesquels on produisait une respiration artificielle au moyen de l'insufflation, et qui se refroidissaient plus vite que lorsqu'on abandonnait le cadavre à lui-même, ne sont pas concluantes ; car il ne suffit pas que l'air pénètre dans les poumons, pour qu'il y ait respiration, il faut encore que le gaz introduit éprouve les altérations qui accompagnent cette fonction. Or, dans ces expériences, les gaz rejetés n'ont pas été examinés.

1087. Chaleur dégagée par les végétaux. — Les végétaux étant le siège de phénomènes chimiques compliqués, on est porté à penser qu'ils sont capables de produire de la chaleur. Il y a certains cas où le dégagement de chaleur est assez prononcé pour être appréciable avec le thermomètre à mercure. Par exemple, le spathe de l'*arum vulgare*, à une certaine époque de sa floraison, présente une température qui peut dépasser de 7° la température ambiante. Ce phénomène, qui a lieu de trois heures à sept heures du soir, atteint son maximum à 5 heures. Chez l'*arum cordifolium* de l'île de France, la température peut s'élever jusqu'à 49°, quand celle de l'air n'est que de 19°. Saussure, au moyen du thermoscope à air, a reconnu un excès d'une fraction de degré au-dessus du milieu ambiant, dans certaines fleurs, à l'époque de la fécondation. Mais ce sont là des cas particuliers.

Ce n'est que depuis l'invention des appareils thermo-électriques qu'on a pu étudier le phénomène dans son ensemble. On se sert dans ce cas d'aiguilles formées de cuivre et d'acier, recouvertes de vernis pour les empêcher d'être altérées par les sucs de la plante, et disposées comme celles dont on fait usage dans les recherches sur la température des animaux (1081). Pour se mettre à l'abri de l'influence refroidissante de l'évaporation, on enfonce l'aiguille dont la température doit être constante, dans un tronçon de branche de même espèce et de même grosseur que celle que l'on veut explorer.

M. Dutrochet a trouvé, par cette méthode, un faible excès de température

[1] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. XV, p. 37.

sur l'air ambiant, dans les jeunes tiges, les feuilles des plantes grasses, les racines, les fruits, les fleurs en bouton; celles-ci n'indiquent d'élévation de température que lorsque la soudure est enfoncée dans l'ovaire. Du reste, cet excès est toujours très petit, au plus de 0°,5; d'autant plus marqué qu'il fait plus chaud; et ne se manifeste que sous l'influence de la lumière, excepté dans les fleurs et les boutons. On sait que c'est en effet sous l'influence de la lumière que les parties vertes des plantes sont le siége des phénomènes chimiques particuliers qui constituent la respiration des végétaux, et qui sont interrompus dans l'obscurité.

§ 3. — SOURCES PERMANENTES DE CHALEUR.

I. Chaleur propre du globe terrestre.

1088. Le globe terrestre possède une chaleur propre intérieure, insensible près de sa surface, mais dont l'existence est attestée par l'accroissement de la température à mesure qu'on s'enfonce plus profondément. Cet accroissement, observé depuis longtemps dans les mines, fut attribué d'abord à la chaleur dégagée par les mineurs et par leurs lampes. Plus tard, le phénomène ayant été observé dans des mines abandonnées, on l'attribua à des fermentations locales; Boyle l'expliquait par la décomposition des pyrites. Depuis, on a fait des expériences concluantes par deux moyens principaux : en observant la température des mines à différentes profondeurs, et en mesurant la température des puits artésiens.

Température des mines. — Les premières observations ont été faites en France, en 1740, par Gensanne, dans les mines de plomb du Giromagny, près de Béfort; elles prouvèrent l'augmentation de la température avec la profondeur. Depuis, on a fait un grand nombre d'observations dans différents pays. Nous citerons celles de d'Aubuisson, en 1806, dans les mines de Poullaouen et d'Huelgoet, en Bretagne; celles de Saussure dans les mines de sel de Bex, dans le canton de Berne; celles de De Humboldt en Saxe et dans plusieurs mines du Pérou et du Mexique. Parmi les observations faites en Angleterre, dans les mines de houille du Nord et dans celles de Cornouailles, il faut citer en particulier celles de M. W. Fox. En 1827, Cordier a rassemblé et discuté les résultats connus, et y a ajouté ses propres observations, après avoir perfectionné les méthodes d'observation[1].

Dans le principe, on se contentait de prendre la température de l'air au fond des mines; mais ce moyen ne peut être exact; Cordier a trouvé quelquefois

[1] *Mémoires de l'Académie des sciences de Paris*, t. VII, p. 473.

6° de différence entre cette température et celle de la roche. L'influence de la présence des mineurs est évidente : d'aprés les expériences de M. Despretz, un homme de moyenne taille dégage environ 180 calories par heure, quantité qui peut élever 542^{m} cubes d'air, de 1°. Une lampe, brûlant 15^{gr} d'huile par heure, produit le même effet sur 409^{mc}. Il résulte de là que 10 mineurs, munis chacun d'une lampe et répartis dans une galerie de 1^{m}1 e largeur sur 2^{m} de hauteur, pourraient échauffer de 1° l'air contenu dans un espace de 4650 métres. Dans les travaux abandonnés, on a à craindre l'introduction de l'air extérieur, le refroidissement dû à l'évaporation des eaux d'infiltration. On a eu l'idée de prendre la température des eaux qui jaillissent au fond des mines ; mais ces eaux, provenant le plus souvent de couches supérieures à celles que l'on observe, ne peuvent alors en donner exactement la température.

Cordier a imaginé un procédé, trés simple et beaucoup plus exact : on perce, avec un foret, un trou oblique dans la paroi de la mine, et l'on y enfonce un thermométre entouré de papier fin et enveloppé d'un étui en fer-blanc. L'ouverture du trou est fermée par un tampon en papier, pour que l'air extérieur ne puisse y circuler. L'expérience doit se faire dans l'angle du front de taille, c'est-à-dire de l'extrémité de la galerie où l'on extrait journellement le minerai, et où la température de la roche n'a pas eu le temps d'être modifiée par le contact prolongé de l'air.

Quand on a la température à une certaine profondeur, pour connaître l'accroissement à partir de la surface du sol, il faut évidemment en retrancher la température de cette surface. Cette dernière est très variable, mais l'observation prouve qu'à une certaine profondeur on trouve une température constante qui coïncide avec la *température moyenne* du lieu. C'est cette température constante qu'il faut retrancher de celle qu'on observe au fond de la mine. En divisant la profondeur, par le nombre de degrés ainsi obtenu, on trouve la quantité dont il faut s'enfoncer pour que la température augmente de 1°. Cordier a obtenu ainsi, dans les mines de houille de Decise, de Littry et de Carmaux, les nombres 15^{m}, 20^{m} et 35^{m}. Ces résultats, trés différents, dépendent de la nature du sol et de sa conductibilité pour la chaleur.

Température des puits artésiens. — La température de l'eau des puits artésiens fait connaître celle de la nappe d'eau qui les alimente. Le thermomètre doit être porté au fond du trou de sonde, la température de l'eau à sa sortie pouvant être différente, parce qu'elle a traversé des couches de terrain plus froides. On se sert dans ces expériences du thermomètre à maximum à déversement de M. Walferdin, décrit plus loin (1100), renfermé dans des tubes trés forts pour résister à la pression.

Les observations faites dans les puits artésiens de Paris et de ses environs, particulièrement dans celui de l'abattoir de Grenelle, à une profondeur de 547^{m} au-dessous du sol, ont donné un accroissement de 1° pour 30^{m} de profondeur, la température de la couche invariable étant de 10°,7. De Humboldt

en partant d'observations faites dans le puits artésien de New-Salzwerck en Westphalie, à 607^m *au-dessous de la mer*, et M. Walferdin, au moyen d'expériences faites dans le puits foré de Saint-André (Eure), et dans celui de Mondorff, dans le grand duché de Luxembourg, où la sonde a pénétré jusqu'à 730^m, sont arrivés à peu près au même résultat. Depuis, M. Walferdin a trouvé près du Creusot, au fond d'un trou de sonde de 816^m de profondeur, et de 495^m au-dessous du niveau de la mer, 38°,31. Au fond d'un autre puits voisin, de 554^m de profondeur, il a trouvé 27°,22; ce qui fait 11°,09 de différence pour une différence de profondeur de 262^m, ou 1° pour 23^m,6. L'accroissement dans ces localités paraît donc plus rapide à une profondeur de 500^m, que près de la surface du sol. Il serait bien intéressant de mesurer la température à de plus grandes profondeurs. Les sondes à tige flexible imitées des Chinois par M. Jobard, permettraient de parvenir, sans trop de dépenses, à une profondeur double de celle que l'on a atteinte jusqu'à ce jour.

En admettant un accroissement de 1° pour 30^m, et partant de la température de 10° à la surface, on trouve qu'il faudrait descendre à 2700^m pour trouver la température de l'eau bouillante, en supposant que la loi reste la même à toutes les profondeurs. A 12 lieues, on trouverait la température de fusion du fer, et à une vingtaine de lieues toutes les matières minérales connues seraient en pleine fusion.

1089. Origine de la chaleur propre du globe. — On a soupçonné depuis les temps les plus reculés, que l'intérieur de la terre est rempli de matières incandescentes. Cette opinion d'un *feu central*, dont on trouve des traces dans les mythologies de presque tous les peuples, n'était d'abord fondée que sur des conjectures, ou sur une sorte d'intuition vague née de l'observation imparfaite de certains phénomènes intenses, comme les éruptions volcaniques. Mais ce n'est qu'à partir du commencement du dernier siècle que l'hypothèse du feu central a pris une tournure scientifique, après la découverte de l'aplatissement de la terre, que l'on a expliqué, en supposant que le globe a été primitivement à l'état de fusion ignée. Buffon a soutenu particulièrement cette opinion, mais elle n'était pas appuyée sur des observations assez nombreuses, ni surtout assez directes, et elle ne tarda pas à tomber dans le discrédit. C'est alors que domina le système neptunien, dans lequel, attribuant à l'eau, la fluidité primitive du globe, on admettait qu'il s'est solidifié du centre à la surface, par voie de cristallisation aqueuse.

L'opinion d'une chaleur centrale reprit bientôt faveur; on remarqua la similitude des produits rejetés par les volcans dans toutes les parties du monde. On reconnut que ces produits viennent de profondeurs situées au-dessous des terrains primordiaux, dont la nature fut mieux connue. Enfin les expériences faites à différentes profondeurs achevèrent de convaincre les esprits les plus prévenus.

Formation du globe. — On admet généralement aujourd'hui que la terre, à l'origine des choses, formait un amas de vapeurs qui se sont liquéfiées par le

refroidissement, de manière à constituer une masse liquide qui a pris d'elle-même la forme sphérique, forme un peu modifiée par le mouvement de rotation (I, 127). Cette masse, formée des substances les plus réfractaires, principalement de métaux, était enveloppée d'une atmosphère épaisse de vapeurs et de gaz, parmi lesquels l'oxygène et l'acide carbonique. Le refroidissement ayant continué, la surface s'est oxydée aux dépens de l'oxygène, et plus tard l'acide carbonique a été absorbé à son tour. En même temps, il s'est formé une croûte solide, soit parce que les oxydes formés sont moins fusibles que les métaux, soit par suite de la continuation du refroidissement. Cette croûte n'a pas tardé à se briser et à se plisser en divers sens, en formant les chaînes de montagnes, parce que le noyau liquide se contractait par le froid plus que ne le faisait l'enveloppe solide. Les eaux provenant des vapeurs condensées se sont alors précipitées dans les parties les plus basses, entraînant avec elles des débris de toutes sortes, qu'elles ont ensuite déposés. Ces phénomènes se reproduisant par intermittences, à mesure que le globe se refroidissait, il en est résulté les différents systèmes de montagnes et la distinction des époques géologiques. Cependant l'enveloppe solide continuait à s'accroître de dehors en dedans. Le diamètre de la terre ayant diminué, en même temps que sa masse restait constante, le mouvement de rotation a dû s'accélérer, et l'aplatissement augmenter, circonstances qui ont aussi concouru à la dislocation de la croûte solide.

Dans ces époques primitives de l'âge du monde, la chaleur de la surface provenait principalement du feu intérieur ; la température devait donc être à peu près la même à toutes les latitudes. Mais la croûte augmentant d'épaisseur, la chaleur centrale se fit sentir de moins en moins, l'action du soleil devint prépondérante, et comme elle n'agit pas avec la même efficacité à l'équateur et dans le voisinage des pôles, les climats commencèrent à se dessiner. En même temps, les êtres organisés firent leur apparition sur le globe et se répandirent sur cet amas de ruines qui en compose la surface ; mais cela ne put avoir lieu qu'après une immensité de siècles.

1090. Etat actuel du globe. — Si l'on admet la loi d'une augmentation de température de 1° pour 30^m de profondeur, la couche solide qui existe actuellement autour du globe ne doit pas avoir plus d'une dizaine de lieues d'épaisseur, c'est-à-dire moins de $\frac{1}{150}$ du rayon de la terre. Cette couche serait représentée par une feuille de papier, sur un globe de 20^{cm} de diamètre. Nous vivons donc sur une mince pellicule dont l'épaisseur doit être très différente dans les divers pays. Les sources thermales nous apportent des indices de la haute température des parties inférieures, et les volcans amènent à la surface, des spécimens des matières en fusion qu'elles recouvrent.

Tremblements de terre. — La masse fluide intérieure tend à obéir aux actions attractives de la lune et du soleil, et à éprouver des changements périodiques de forme, analogues à ceux que nous présente la mer dans les marées. La croûte solide est donc soumise à des efforts intérieurs qui tendent

à la déformer alternativement, et auxquels sa rigidité la fait résister. Cependant quand les actions de la lune et du soleil s'ajoutent, ce qui a lieu aux sygyzies, c'est-à-dire quand les centres des deux astres sont en ligne droite avec celui de la terre, l'enveloppe solide peut être ébranlée, dans les pays où la croûte a le moins d'épaisseur, ou se trouve assise d'une manière moins stable. C'est là une des causes des tremblements de terre. Il résulte en effet du relevé fait par M. Perrey, de ces désastreux phénomènes pendant un demi-siècle, qu'ils sont plus fréquents aux époques des sygyzies qu'aux quadratures, au périgée qu'à l'apogée, et aux heures voisines du passage de la lune au méridien qu'au moment où cet astre s'en trouve éloigné de 90° [1].

1091. Résultats du calcul. — L'existence d'une chaleur centrale se trouve confirmée par les calculs mathématiques de Fourier. Il résulte de la savante analyse de ce célèbre géomètre, les conséquences suivantes :

1° Si la chaleur de l'intérieur de la terre était due à l'action prolongée du soleil, la température sur une même verticale serait constante ou irait en diminuant à mesure qu'on s'enfoncerait, suivant que cette action aurait été suffisamment prolongée ou que l'état final n'aurait pas encore été atteint.

2° La croûte solide reçoit actuellement de la chaleur venant du soleil, et de la chaleur venant de l'intérieur du globe. Cette dernière élèverait de $\frac{1}{4}$ de degré la température de la surface, si la terre avait la conductibilité du fer. Mais cette élévation n'est au plus que de $\frac{1}{30}$ de degré, si l'on admet que la conductibilité moyenne des matières qui composent la croûte solide est 9 fois moindre que celle du fer, suivant l'estimation de B. de Saussure. On voit donc que l'état actuel diffère peu de l'état définitif qui tend à s'établir.

3° L'abaissement actuel de température de la surface n'est que de $\frac{1}{57600}$ de degré par siècle. Il n'a été que de $\frac{1}{288}$, au plus, depuis Hipparque. Le refroidissement, d'abord rapide, est devenu excessivement lent.

4° Cependant la chaleur intérieure se perd toujours, en traversant la croûte solide sans en modifier sensiblement la température (804). Fourier trouve que cette quantité de chaleur serait capable de fondre, pendant un siècle, une couche de glace de 3 mètres d'épaisseur.

Cette perte de chaleur du noyau liquide est accompagnée d'une contraction qui doit changer l'équilibre de l'enveloppe solide, et déterminer de temps à autre des dislocations d'autant plus intenses que l'épaisseur et la rigidité étant très grandes, ces phénomènes ne se produisent qu'après un changement notable des conditions de l'équilibre primitif. On peut donc penser que de nouvelles révolutions sont possibles à la surface du globe. Mais elles ne peuvent se produire qu'à des intervalles de temps immenses ; en effet, Laplace, en partant des observations d'Hipparque, a établi que la durée du jour n'a pas diminué de $\frac{1}{300}$ de seconde depuis l'époque de ce célèbre astronome ; d'où l'on

[1] *Comptes-rendus de l'Académie des sciences*, t. XXXVIII, p. 1038.

doit conclure que le retrait éprouvé par le globe, depuis cette époque, n'a pas pu augmenter sensiblement la vitesse de rotation.

Hypothèse de Poisson. — L'accroissement de température que l'on observe quand on s'enfonce dans l'intérieur du globe, a été expliqué par Poisson en supposant que la terre aurait traversé, il y a des milliers de siècles, une partie de l'espace où régnerait une très haute température. Là, elle se serait échauffée jusqu'à une certaine profondeur, et maintenant elle perdrait peu à peu cette chaleur d'emprunt. Poisson avait été conduit à formuler cette nouvelle hypothèse en remarquant que, d'aprés la loi de l'accroissement de la température avec la profondeur, les matériaux intérieurs du globe devraient être à l'état de vapeur, ayant une tension énorme à laquelle la croûte du globe ne pourrait résister. Mais il est bien évident que la loi, en supposant qu'elle soit exacte, ne peut plus s'appliquer dès qu'on arrive à la matiére en fusion. Il en est comme d'un creuset rempli de plomb fondu; la température des parois augmente de l'extérieur à l'intérieur, mais elle reste à peu près constante dans toute la masse liquide. Aussi, l'hypothèse de Poisson n'a pas été adoptée par les géologues et les physiciens; nous la citons, seulement à cause du renom de celui qui l'a imaginée.

II. Chaleur solaire.

1092. Du soleil. — La source la plus abondante de chaleur pour la surface du globe est le *soleil*. L'exposition aux rayons solaires se nomme *insolation*.

Nous ne savons rien de la cause qui engendre la quantité immense de chaleur qui s'échappe du soleil. Cet astre se présente à nous sous forme d'un disque soutendant un angle de 32′ en moyenne; son diamètre est égal à 112 fois celui de la terre, et, par conséquent, son volume à 1404928 celui de ce dernier globe. Le soleil tourne sur lui-même en 25,34 jours.

Examiné au télescope, le soleil se montre parsemé de rides ou de points, nommés *lucules*, plus brillants que le reste de la surface, que Herschell compare, pour l'aspect, à la peau d'une orange.

Le plus souvent, on remarque sur le soleil, des taches obscures, de dimensions quelquefois assez considérables pour qu'on puisse les distinguer sans instrument grossissant. Elles ont alors un diamètre apparent de 30″ au moins, ou $\frac{1}{64}$ de celui du soleil; ce qui correspond à 1 à 2 fois le diamètre de la terre, ou environ 13,000 kilomètres. Le nombre des taches est très variable; quelquefois il n'y en a aucune pendant plusieurs mois. Elles sont changeantes; on en voit assez souvent se transformer à vue d'œil et disparaître, d'autres fois elles persistent assez longtemps pour qu'on puisse les observer pendant cinq ou six révolutions consécutives du soleil. Souvent elles sont disposées par

groupes. On n'en voit que très rarement au-delà de 35° de part et d'autre de l'équateur solaire. La *fig.* 807 représente une portion du disque du soleil avec plusieurs groupes de taches.

Il est à remarquer que les taches qui ne sont pas trop petites, sont composées



Fig 807.

de deux parties distinctes ; l'une très sombre à contours nets, l'autre qui entoure la première, moins foncée, d'une teinte à peu près uniforme, si ce n'est près du contour de la tache où elle paraît un peu plus claire ; on la nomme *la pénombre.* Vue avec un grossissement suffisant, elle présente une apparence rayonnée (*fig.* 808).

Quand une tache se trouve rapprochée du bord du disque solaire, on remarque que la pénombre disparaît du côté du centre de l'astre, tandis qu'elle persiste du côté du bord. Enfin, la surface du soleil présente souvent des parties plus brillantes que le reste, nommées *facules*, et qui précèdent souvent les taches et annoncent leur apparition. Quelquefois les facules se montrent au point où une tache vient de disparaître.



Fig. 808.

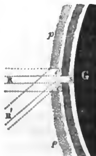


Fig. 809.

Constitution physique du soleil. — Pour expliquer les faits qui précèdent, on suppose que le soleil est composé d'un globe peu lumineux G (*fig.* 809) enveloppé d'une couche plus brillante *cc*, qui en est à une certaine distance, recouverte elle-même d'une atmosphère gazeuse *pp* d'un éclat éblouissant, nommée *photosphère*, dont la surface ondulée forme les *lucules*. S'il se forme

dans ces deux enveloppes, qui ne se touchent pas, des ouvertures correspondantes *s*, *oo*, dont la seconde soit plus grande que la première, un observateur placé en R verra la partie *s* du globe obscur, et, tout autour, une portion de la couche *cc*, qui formera la pénombre. On comprend maintenant pourquoi la pénombre disparaît du côté opposé au bord du disque solaire, quand la tache s'approche de ce bord; c'est qu'elle est vue obliquement. Par exemple, un observateur placé en R′ ne verrait pas de pénombre du côté R′. Pour expliquer la formation des ouvertures des deux enveloppes, on suppose qu'il se dégage, du noyau obscur, des courants violents de gaz qui percent les enveloppes et qui, en se dilatant par leur force expansive, produisent une ouverture plus large dans la photosphère que dans la couche inférieure. Les facules qui se voient souvent près des taches, s'expliquent par l'accumulation de la matière lumineuse refoulée autour de l'ouverture produite par le gaz, et les lignes divergentes (*fig.* 808) par l'irrégularité des bords des ouvertures, qui sont comme déchirés.

Arago a confirmé l'existence d'une photosphère gazeuse, en montrant que la lumière du soleil n'est pas *polarisée*. Nous verrons, dans l'optique, qu'il en est de même de la lumière des flammes, tandis que celle qui émane des corps solides ou liquides incandescents est en partie polarisée. Remarquons que le noyau sombre du soleil n'est pas nécessairement obscur, car tout corps paraît noir à côté d'un autre très éclatant; c'est ainsi que la flamme d'une bougie paraît sombre quand on la projette sur le disque solaire. Enfin, il semble résulter de l'observation des éclipses totales du soleil, qu'il existe au-delà de la photosphère, une matière lumineuse qui apparaît pendant les éclipses sous forme d'une lueur diffuse, rayonnée, diminuant d'intensité à mesure qu'elle s'éloigne de l'astre, et présentant une largeur à peu près égale au diamètre du disque solaire.

1093. QUANTITÉ DE CHALEUR FOURNIE PAR LE SOLEIL. — La quantité de chaleur que le soleil communique dans un temps donné à une surface sur laquelle ses rayons tombent normalement, dépend de la hauteur de l'astre au-dessus de l'horizon, et de l'état de pureté de l'atmosphère. Chacun a pu remarquer combien la chaleur du soleil est faible quand il vient de se lever ou quand il est près de se coucher, même quand le ciel est pur. Il en est de même de la lumière qu'il nous envoie; c'est pourquoi nous pouvons, sans inconvénient, regarder directement cet astre quand il est près de son coucher. Ces résultats s'expliquent facilement : l'air absorbe une partie de la chaleur qui traverse l'atmosphère, en s'échauffant à ses dépens; et la couche traversée est d'autant plus épaisse que le soleil est plus près de l'horizon.

De Saussure, un des premiers, a cherché à déterminer par l'expérience la quantité de chaleur que le soleil fournit pendant une minute à l'unité de surface. Il employait pour cela un appareil nommé *héliothermomètre*, consistant en un thermomètre renversé, dont le réservoir noirci occupait l'intérieur d'une boîte en liége recouverte en dedans de noir de fumée, et fermée en dessus par des lames de verre. L'appareil étant orienté de manière à recevoir les rayons

solaires normalement aux lames de verre, il observait l'échauffement du thermomètre pendant une minute. Il y avait à tenir compte de la chaleur rayonnée par l'appareil. Nous verrons tout à l'heure, en parlant des recherches de M. Pouillet, comment se font ces sortes d'expériences.

Herschell a imaginé un appareil analogue à celui de Saussure, qu'il nomme *actinomètre*. Ces instruments, moins exacts que ceux que nous allons décrire, ont permis néanmoins de suivre le décroissement de l'intensité des rayons, à mesure que le soleil s'écarte du méridien.

1094. Expériences de M. Pouillet. — On doit à M. Pouillet une longue série d'expériences sur la chaleur solaire, faites au moyen de deux appareils qu'il nomme *pyrhéliomètre direct* et *pyrhéliomètre à lentille*[1].

Le pyrhéliomètre direct (*fig.* 810) consiste en un vase v, v' en argent très mince, rempli d'eau, et dont la base supérieure est recouverte de noir de fumée. Ce vase a 1 décimètre de diamètre; il renferme la boule d'un thermomètre fixé au moyen d'un bouchon, dont on voit la disposition en t. Tout l'appareil est soutenu par un support articulé c, dans lequel on peut le faire tourner sur lui-même, pour agiter l'eau du vase. Le cercle d reçoit l'ombre de ce vase, et sert à l'orienter de manière que les rayons solaires dirigés suivant rr' tombent perpendiculairement sur sa base supérieure.

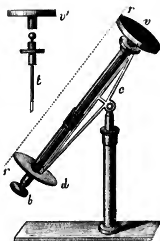


Fig. 810.

Voici comment on opère : le vase étant à peu près à la température ambiante, on met l'appareil à l'ombre, très près du lieu où l'on doit observer, de manière qu'il voie la même étendue du ciel, et l'on note pendant 4 minutes, et de minute en minute, son échauffement ou son refroidissement. On porte ensuite l'appareil au soleil, en l'abritant avec un écran, et on l'oriente : cette manœuvre emploie la 5ᵉ minute. On enlève l'écran, et le thermomètre monte sous l'influence des rayons solaires, pendant qu'on fait tourner le vase pour agiter l'eau. Au bout de 5 minutes, on reporte l'appareil à l'ombre dans sa première position, et l'on observe de nouveau son refroidissement pendant 5 minutes. Si r est le refroidissement observé, et r' celui qui s'est produit lors des premières observations faites à l'ombre, on voit que la moyenne $\frac{1}{2}(r+r')$ représentera la perte de l'appareil par rayonnement pendant l'action solaire. Si donc s est l'échauffement de l'appareil

[1] *Comptes-rendus des séances de l'Académie des sciences* de Paris, t. VII, p. 24.

pendant son exposition aux rayons solaires, l'élévation de température t produite par le soleil, sera $t = s + \frac{1}{2}(r + r')$; et si l'on représente par p le poids de l'eau augmenté de l'équivalent du vase en eau, la quantité de chaleur correspondante sera tp. Enfin, la surface du vase étant $\frac{1}{4}\pi d^2$, la quantité de chaleur reçue, *pendant* 1 *minute*, sur 1 centimétre carré, sera représentée par

$$\frac{1}{5}\frac{tp}{\frac{1}{4}\pi d^2} = \frac{4p}{5\pi d^2}\,t = 0{,}2624 \,.\, t.$$

Le coefficient de t convient aux dimensions de l'appareil de M. Pouillet.

Pyrhéliomètre à lentille. — L'air doit être calme pendant l'expérience, sans cela il enlèverait une quantité notable de chaleur au vase v, qui ne contient que 100 grammes d'eau. Quand il fait du vent, M. Pouillet emploie le pyrhéliomètre à lentille (*fig.* 811), dans lequel il entre plus de 600 grammes d'eau. Les rayons solaires sont concentrés par une lentille L, soutenue par un support articulé qui permet de lui donner différentes positions. Le vase d'argent rempli d'eau, vb, est conformé de manière que l'axe de la lentille puisse toujours se placer normalement à la face noircie ab, quelle que soit la position de la lentille, que les rayons solaires doivent toujours traverser parallélement à son axe. Un agitateur n rend la température de l'eau uniforme. On détermine, avec cet appareil, la quantité de chaleur reçue pendant une minute sur 1 centimètre carré, en suivant la marche indiquée pour le pyrhéliomètre direct. La formule est aussi la même; il y a seulement une correction à faire, à cause de la chaleur que la lentille absorbe. Cette correction se fait en comparant les résultats obtenus, dans un air calme, avec les deux pyrhéliomètres. M. Pouillet a reconnu ainsi que les lentilles de verre les plus transparentes absorbent encore $\frac{1}{8}$ de la chaleur incidente.

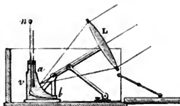


Fig. 811.

1095. Absorption par l'air. — En observant au moyen de ces deux appareils, à différentes heures du jour et par un temps pur, M. Pouillet a constaté que la chaleur reçue pendant une minute est d'autant plus petite que le soleil est plus prés de l'horizon. Ayant alors comparé les résultats obtenus d'heure en heure, pendant un grand nombre de jours et dans différentes saisons, il a reconnu que les élévations de température du pyrhéliomètre sont données par les formules

$$t = ap^{\epsilon}, \qquad \text{d'où} \qquad c = 0{,}2624\, ap^{\epsilon}. \qquad [2]$$

a et p sont des constantes que l'on détermine au moyen de deux valeurs de t

obtenues directement dans une même journée ; l'épaisseur se calcule au moyen de la formule trigonométrique

$$e = \sqrt{2rh + h^2 + r^2 \cos^2 z} - r \cos z,$$

dans laquelle r est le rayon de la terre, h la hauteur de l'atmosphère, et z la distance zénitale du soleil. M. Pouillet a adopté $r = 80$, et a pris la hauteur h pour unité.

En déterminant les constantes a et p à différents jours, la valeur de a s'est toujours trouvée la même et égale à 6°,72 ; c'est la *constante solaire* ; de sorte que la formule [2] devient $c = 1,7633 pe$. Au contraire, p change d'un jour à l'autre ; c'est la *constante atmosphérique* ; elle dépend de la pureté de l'air. Voici quelques valeurs de cette constante, obtenues en différentes saisons :

28 juin.	27 juillet.	22 septembre.	4 mai.	11 mai.	Solstice d'hiver.
0,7244	0,7585	0,7780	0,7556	0,7888	0,7488

Pour donner une idée du degré d'exactitude de la formule, nous citerons, parmi les nombreuses séries obtenues par M. Pouillet, celle du 4 mai 1838.

HEURE de l'observation.	ÉPAISSEUR e de l'atmosphère.	ÉLÉVATION DE TEMPÉR. observée.	ÉLÉVATION DE TEMPÉR. calculée.	DIFFÉRENCES.
Midi	1°,191	4°,80	4°,80	0
1 heure	1,223	4,70	4,76	—0,06
2 heures	1,325	4,60	4,62	—0,02
3 heures	1,529	4,30	4,36	—0,06
4 heures	1,912	3,90	3,92	—0,02
5 heures	2,603	3,20	3,22	—0,02
6 heures	4,311	1,95	1,94	+0,01

On voit que les différences entre les résultats de l'observation et ceux que donne la formule, sont tout à fait négligeables, et cependant les rayons solaires traversaient une couche d'air de 24 lieues à midi, et de 86 lieues à 6 heures. Cette concordance suppose évidemment que p reste constant pendant toute la journée, c'est-à-dire que l'état de l'atmosphère ne change pas.

L'exactitude de la formule $t = ap^e$ une fois vérifiée, on peut s'en servir pour calculer la proportion de chaleur qu'absorbe l'atmosphère. En effet, si nous faisons $e = 1$, ce qui revient à supposer le soleil au zénith, les valeurs de p seront entre elles comme les quantités de chaleur reçues en 1 minute sur 1 centimètre carré ; et en appelant 1 la quantité de chaleur qui se présente pour entrer dans l'atmosphère, $1 - p$ sera la proportion absorbée. On voit qu'elle est égale, le 28 juin, à $1 - 0,7244 = 0,2756$. Cette quantité de

chaleur absorbée, pour les rayons tombant verticalement sur 1 centimètre carré, est généralement comprise entre 0,18 et 0,25 ; elle peut donc être égale à $\frac{1}{4}$ de la chaleur qui arrive dans cette direction.

La chaleur transmise obliquement est absorbée en bien plus grande proportion. En faisant la somme des quantités de chaleur qui arrivent aux différents points de l'hémisphère terrestre, sous des obliquités qui varient depuis 0° jusqu'à 90°, M. Pouillet a trouvé que, pour $p=0,75$, la proportion absorbée par l'air est comprise entre 0,5 et 0,4, c'est-à-dire égale à près de la moitié de la chaleur envoyée par le soleil, et cela quand l'atmosphère est pure[1]. L'autre moitié est reçue par la surface de la terre, et distribuée inégalement suivant l'obliquité des rayons.

Quantité de chaleur envoyée par le soleil à la terre. — Si dans la formule [2], on fait $e = 0$, ce qui revient à supposer que l'atmosphère n'existe pas, on trouve, pour la quantité de chaleur reçue en 1^m sur 1 centimètre carré, $c = 1,7633$, quand l'atmosphère n'absorbe aucune portion de la chaleur incidente.

On peut déduire de là la quantité de chaleur que reçoit par minute un hémisphère de la terre privée de son atmosphère. Cette quantité de chaleur n'est autre que celle que recevrait le grand cercle sur lequel se projette l'hémisphère (775), c'est-à-dire $1,7633\pi R^2$; et chaque centimètre carré de l'hémisphère considéré, recevra pendant une minute, en supposant la chaleur répartie uniformément, la quantité $\frac{1,7633 \, . \, \pi R^2}{4\pi R^2} = 0,4408$.

Comme la terre tourne en 24 heures, cette quantité, multipliée par 60×24, représente en moyenne la quantité reçue dans un jour par chaque centimètre carré de la surface du globe; d'où l'on conclut, en multipliant par le nombre 364, des jours de l'année, que la quantité de chaleur reçue pendant une année par la terre dépourvue d'atmosphère, est la même que si chaque centimètre carré recevait, en nombre rond, 231000 calories.

Ce nombre représente également la quantité de chaleur qui entre annuellement par un centimètre carré dans l'atmosphère, en supposant la chaleur répartie uniformément sur le globe. Pour donner une idée de cette quantité, M. Pouillet remarque qu'elle suffirait pour fondre, en une année, une couche de glace de $3^m,89$ d'épaisseur, qui recouvrirait la terre.

Si nous voulons maintenant connaître la quantité de chaleur qui arrive à la surface du sol, il faut retrancher du nombre 231000, la quantité absorbée par l'air. M. Pouillet a trouvé que, d'après ses observations faites à Paris, la surface du sol reçoit 0,7390 de la chaleur qui traverse l'atmosphère. Des expériences faites à Orange au moyen du pyrhéliomètre, par M. de Gasparin, ont

[1] Ce calcul dépend d'une intégrale de la forme $c \int \frac{p^e de}{e^2}$, qu'on obtient par diverses méthodes d'approximation.

donné, pendant les mois d'août et de juillet, une moyenne de 0,4904. M. Forbes est arrivé, en Suisse, au nombre de 0,680 ; et M. Quételet, à Bruxelles, à 0,615. Les différences entre ces divers résultats tiennent surtout aux variations que subit la pureté de l'atmosphère.

Chaleur totale émise par le soleil. — Considérons une surface sphérique ayant pour rayon la distance moyenne D du centre du soleil à la terre. Chaque centimètre carré de cette surface reçoit par minute $1,7653^{cal}$, et la surface entière, $1,7653 \times 4\pi D^2$ calories. Cette quantité de chaleur représente la totalité de la chaleur émise par le soleil dans toutes les directions. Chaque centimètre carré de la surface solaire rayonne donc, pour sa part, cette même quantité divisée par $4\pi R^2$, R étant le rayon du soleil; ce qui fait $1,7633 \frac{D^2}{R^2}$. Or, si nous menons du centre de la terre T (*fig.* 812) une tangente au disque solaire *s*, nous aurons, dans le triangle rectangle T*sr*, $\frac{D}{R} = \frac{1}{\sin 2\alpha}$. En faisant le calcul, on trouve 84888 calories. Cette quantité de chaleur serait capable de fondre, en une minute, une couche de glace qui recouvrirait la surface du soleil, et aurait $11^m,80$ d'épaisseur; ou en un jour une couche de 4 lieues et $\frac{1}{4}$, et en une année une couche de 1547 lieues.

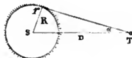


Fig. 812.

Tels sont les résultats trouvés par M. Pouillet; ils ne s'appuient sur aucune hypothèse et ne dépendent que de l'exactitude des indications données par le pyrhéliomètre. Mais remarquons que ces indications ne sont qu'approximatives; car le noir de fumée diffuse une portion de la chaleur incidente (741), et quand on multiplie le résultat obtenu pour 1 centimètre carré, par le nombre qui représente la surface immense que l'on considère ensuite, l'erreur est multipliée par le même nombre. Les résultats définitifs ne font donc que donner un aperçu très remarquable des quantités de chaleur reçues par la terre, et émises par le soleil.

1096. Depuis les expériences de M. Pouillet, divers observateurs ont fait des recherches sur la radiation solaire et sur l'absorption des rayons par l'atmosphère. M. Forbes a publié un long Mémoire dans lequel il rapporte les observations qu'il a faites de 1832 à 1842, avec M. Kaemtz, au moyen de l'actinomètre de De Saussure et d'autres appareils remplissant le même objet[1]. Il résulte de ces expériences que : 1° la radiation solaire est beaucoup plus forte sur les montagnes que dans les plaines. Ce résultat, déjà constaté par Saussure, a été déduit d'observations faites à Brienz et sur le Faulhorn, dont le niveau diffère de 2119^m; il s'explique par la différence d'épaisseur de la couche atmosphérique. 2° La proportion absorbée par une couche d'air est

[1] *Phil. magaz.* (1842); et *Bibl. de Gen.* (arch. des sc., 1842), t. XLI, p. 179.

d'autant plus faible que les rayons ont déjà traversé une couche plus épaisse. Ce qui tient à ce que certains rayons, les rayons obscurs, sont plus facilement absorbés par l'atmosphère, que les rayons lumineux ; les premiers forment à peu près les 0,8 du nombre total. Cela revient à dire que l'atmosphère est *thermochroïque*, de même qu'elle est colorée. La proportion de chaleur que conserve un rayon qui traverse verticalement l'atmosphère par un temps clair, est comprise entre la moitié et le quart de celle qu'il possède avant son entrée dans l'atmosphère. 3° L'intensité diminue sensiblement en progression géométrique quand l'épaisseur traversée ne dépasse pas quatre fois la hauteur de l'atmosphère. Il faudrait conclure de là que la quantité de chaleur qui arrive à la terre est bien plus faible qu'on ne l'avait cru d'abord.

Des expériences de Melloni montrent bien que l'air est thermochroïque; il a constaté qu'une lame d'eau laisse passer 0,60 de la chaleur incidente à midi, et 0,32 seulement, une heure environ avant le coucher du soleil. Le cristal de roche enfumé laisse, au contraire, passer 0,62 de la chaleur, une heure avant le coucher du soleil, et 0,30 seulement à midi. M. Volpicelli a multiplié ces sortes d'expériences, avec un grand nombre de lames différentes.

Nous citerons encore les expériences de M. de Gasparin, faites au moyen d'un instrument particulier[1] : une boule en cuivre mince, de 10^{cm} de diamètre, recouverte de deux couches de noir de fumée, est exposée aux rayons solaires ; à son centre se trouve la boule d'un thermomètre. Cet appareil très simple a donné des résultats qui s'accordent suffisamment avec ceux que fournit le pyrhéliomètre. M. de Gasparin a trouvé, près de Tarascon, au mois de février 1853, que la proportion de chaleur solaire arrivant à la terre était 0,68 de celle qui traversait l'atmosphère. M. Haëghens, au moyen du même instrument, trouvait le 1er mai, à Versailles, 0,431 à 8 heures du matin, 0,7276 à 11^{h},50^{m}, et enfin 0,7590 à 6 heures du soir.

1097. Température des différents points du disque solaire. — L'éclat est un peu moins vif près des bords du disque solaire que dans les parties centrales. Ce résultat, constaté par différents observateurs, se voit immédiatement sur des images du soleil obtenues très rapidement au daguerréotype par MM. Fizeau et Foucault. Le P. Secchi a reconnu, en 1852, qu'il en est de même de la chaleur, c'est-à-dire que les rayons qui partent des bords du disque sont plus faibles que les autres[2]. Pour le constater, il disposa la pile d'un thermomultiplicateur sur le prolongement de l'axe d'une lunette astronomique montée parallactiquement, c'est-à-dire mise en communication avec une horloge qui lui fait suivre le soleil dans son mouvement diurne. Un large écran, porté par le tuyau de la lunette, abritait l'appareil thermométrique, des rayons directs du soleil et du rayonnement de l'atmosphère. La pile était garnie de doubles diaphragmes présentant une fente horizontale qui laissait

[1] *Comptes-rendus des séances de l'Académie des sciences* de Paris, t. XXXVI, p. 676.
[2] *Comptes-rendus des séances de l'Acad. des sciences* de Paris, t. XXXIV, XXXV et XXXVI.

huit soudures à découvert. Il se forme au-delà de l'oculaire de la lunette, comme nous l'expliquerons dans l'optique, une image amplifiée du soleil, que l'on peut recevoir sur un écran. La pile est placée de manière à recevoir sur sa base, la partie de l'image qui correspond au point du disque solaire que l'on veut observer.

Le P. Secchi a reconnu, par ce moyen, que : 1° la température va en diminuant du centre du disque solaire au bord, où la température est presque moitié de celle du centre. Ce résultat peut s'expliquer en admettant que les rayons, avant de parvenir à la terre, ont à traverser une atmosphère absorbante qui envelopperait le soleil au-delà de la photosphère (1092) ; il est évident que les rayons qui partent des bords du disque ont à traverser une bien plus grande épaisseur de cette atmosphère que ceux qui partent du milieu du disque. 2° La température n'est pas la même partout à égale distance du centre ; les régions polaires sont moins chaudes que les régions équatoriales. 3° Il semble aussi que les différentes faces que le soleil nous présente successivement dans son mouvement de rotation, n'ont pas la même température. Ce fait avait été déjà reconnu par M. Buys-Ballot à l'Observatoire d'Utrecht. 4° Dans le voisinage des taches, la chaleur est plus faible, et les facules ne produisent pas d'augmentation appréciable de température.

Il semble enfin résulter de la comparaison des années pendant lesquelles le soleil a présenté beaucoup de taches, à celles où il n'en avait que très peu, que la température moyenne des premières est un peu plus basse que celle des autres. Mais la différence étant très peu prononcée, ce résultat a besoin d'être confirmé par de nouvelles observations.

CHAPITRE VIII.

PHÉNOMÈNES MÉTÉOROLOGIQUES

DÉPENDANT DE LA CHALEUR.

1098. Nous avons déjà dit (I, 385) que la *météorologie* a pour objet l'étude des phénomènes qui se passent dans l'atmosphère. Nous allons parler, dans ce chapitre, des *météores* qui dépendent de la distribution de la chaleur à la surface du globe et de la vapeur d'eau répandue en plus ou moins grande quantité

dans l'air. Ces phénoménes exercent une influence directe sur les êtres organisés, principalement sur les végétaux qui, fixés au sol, en subissent les effets sans pouvoir s'y soustraire.

Climatologie. — La partie de la météorologie qui va nous occuper peut se diviser en deux parties : dans l'une, on cherche à expliquer les phénomènes, en montrant comment ils se rattachent aux lois de la physique ; dans l'autre, on les observe en eux-mêmes, on constate leur fréquence, leur intensité, l'ordre de leur succession, afin de caractériser le *climat* du lieu des observations. On nomme *climat* d'une contrée l'ensemble de tous les phénomènes atmosphériques qui peuvent exercer une influence quelconque sur les êtres organisés. Ces phénomènes sont principalement ceux qui sont relatifs à la distribution de la chaleur et de l'humidité. La *climatologie*, ou étude des climats, dont on trouve quelques notions chez tous les peuples de l'antiquité, présente une utilité incontestable. En effet, indépendamment de l'influence qu'exerce le climat sur la végétation, sur la station géographique des plantes et des races animales, sur le tempérament, l'intelligence et le caractére de l'homme, la connaissance des climats doit présider à tous les essais agricoles et à toutes les tentatives d'acclimatation de plantes ou d'animaux ; elle doit servir de guide au médecin dans ses prescriptions hygiéniques, à l'ingénieur dans l'établissement de certains travaux, aux gouvernements pour le choix des localités où ils se proposent d'établir des colonies.

La climatologie est la partie la moins avancée de la météorologie. On est arrivé à expliquer, au moins dans leur ensemble, la plupart des phénomènes atmosphériques ; mais on a fait peu de progrés dans l'étude des climats. Les influences que subissent les êtres organisés, et particulièrement les végétaux, sont si variées, et elles se compliquent tellement par leur coexistence, qu'il faut un très grand nombre d'observations pour démêler les lois de leur évolution. Il y a à considérer l'humidité de l'air et du sol ; la fréquence des brouillards ; la rosée ; la quantité de pluie et de neige, les saisons où elles tombent ; la perméabilité du sol, qui permet à l'eau de pénétrer à une plus ou moins grande profondeur ; la fréquence des orages, de la grêle ; les vents secs ou humides, leur violence, leur direction. Relativement à la chaleur, il faut étudier la température moyenne de l'année, du mois, du jour, les maximum et les minimum, la durée de chaque état, la fréquence et la rapidité des changements. L'irradiation solaire, suivant la pureté de l'air, a aussi une influence marquée ; chacun sait combien l'exposition au midi est favorable à la végétation ; les plantes qui croissent à l'ombre sont faibles, donnent peu de fruits ; les plantes qui couvrent les montagnes, étant exposées à une irradiation intense, ont une vigueur inconnue dans les plaines du Nord, à égalité de température.

Caractériser un climat est donc une entreprise longue et pénible, et il y a peu de temps qu'on se fait une idée exacte du nombre des éléments à recueillir. Pendant longtemps on a cru qu'il suffisait de connaître la température moyenne

du lieu et les maximum et minimum. L'énumération qui précède montre combien d'autres circonstances sont à considérer. Remarquons encore, avec de Candolle, que la plupart des plantes ne végètent pas au-dessous de 0°; de sorte qu'il est indifférent pour elles que la température soit 0° ou —*t*°, pourvu que *t* ne soit pas assez grand pour qu'elles périssent. Cependant les températures inférieures à 0° sont comptées et soustraites, dans le calcul des températures moyennes. De même, la germination n'ayant lieu qu'à partir d'une certaine température, qui varie d'une espèce à l'autre, toutes les températures plus basses n'ont pas d'influence sur ce phénomène.

Il résulte aussi des observations de MM. de Humboldt, de Candolle, Boussingault, de Gasparin, Quételet..., que chaque espèce de plantes exige, à partir d'une certaine température, la même quantité de chaleur, pour se développer également; d'où il résulte qu'une plante se développe d'autant plus rapidement que cette chaleur est fournie en moins de temps; il faudrait donc aussi évaluer les *quantités* de chaleur.

Les observations météorologiques ne datent que du XVIIe siècle, époque de l'invention du thermomètre et du baromètre, et elles ont pris un grand développement depuis 30 à 40 ans. Des voyageurs intrépides ont parcouru les mers, ont pénétré dans des contrées jusque-là inexplorées, enregistrant des observations de toutes sortes, qui, malgré le peu de durée qu'elles embrassent, peuvent néanmoins donner une idée de quelques-unes des particularités que présentent ces climats inconnus. Dans ces derniers temps, les instruments ont été perfectionnés; on en a imaginé qui enregistrent eux-mêmes leurs propres indications. Divers gouvernements, comprenant combien les études climatologiques ont d'importance pour l'agriculture, la navigation et l'hygiène publique, ont construit des observatoires de météorologie placés dans des stations choisies avec soin. De semblables établissements, munis de bons instruments, et où les observations se font suivant des règles déterminées, existent actuellement en France et dans l'Algérie, en Angleterre et dans ses colonies, aux Etats-Unis, en Autriche, en Allemagne, en Russie, en Egypte, au Cap. M. Quételet a fondé, à Bruxelles, un observatoire qu'on peut citer comme un modèle, pour la manière dont s'y font les observations météorologiques, et pour les soins qu'on y apporte. On a formé, en outre, des associations destinées à centraliser les efforts de ces observateurs modestes et dévoués qui, livrés à leurs propres forces, recueillent avec une persévérance digne des plus grands éloges, des observations nombreuses et suivies.

Les télégraphes électriques sont venus dernièrement fournir à la météorologie un moyen précieux, qui permet de constater la simultanéité de certains phénomènes, ou la rapidité de leur propagation. On peut aussi, par leur secours, avertir à l'avance les contrées éloignées, de l'arrivée de certains météores désastreux, afin qu'on ait le temps de se précautionner contre leurs effets.

§ 1. — DISTRIBUTION DE LA CHALEUR A LA SURFACE DU GLOBE.

I. Instruments d'observation.

1099. THERMOMÈTRES A MAXIMUM ET A MINIMUM. — Les thermomètres destinés aux observations météorologiques doivent avoir peu de masse, pour se mettre à chaque instant en équilibre de température avec l'air. Il suffit, dans nos climats, que l'échelle soit comprise entre —25° et 50° Les degrés doivent être assez grands pour qu'on puisse marquer les dixièmes, et il faut vérifier de temps en temps la position du zéro. On a souvent besoin de connaître le maximum et le minimum des températures qui ont eu lieu pendant un certain temps. On emploie pour cela des instruments spéciaux qui conservent l'indication des températures qu'ils ont éprouvées.

Thermomètres de Rutherfort. — Ces instruments ont leur tige horizontale. Le thermomètre à maximum *i* (*fig.* 813) est à mercure, et ne diffère

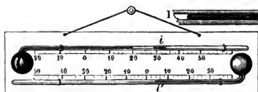


Fig. 813.

d'un thermomètre ordinaire qu'en ce que le mercure pousse, en se dilatant, un petit cylindre d'acier ou d'émail *i*, qui reste au point où il a été transporté quand ensuite le mercure se contracte, conservant ainsi l'indication de la plus haute température qu'a éprouvée l'instrument. Il arrive quelquefois que l'index pénètre dans le mercure; pour éviter cet inconvénient, M. Greiner recouvre le ménisque de mercure, d'une calotte en verre très mince sur laquelle s'appuie l'index.

Le thermomètre *à minimum* est à alcool. Un petit cylindre en émail *i'*, noyé dans le liquide, qui le mouille, sert d'index. Quand la colonne d'alcool se contracte, le ménisque qui la termine entraîne l'index, à cause de son adhérence capillaire; et, si le liquide vient ensuite à se dilater, le ménisque concave se sépare de l'index et l'abandonne au point où il avait été entraîné du côté du réservoir. On voit, en I, l'index *i'* représenté avec sa grandeur naturelle. Il faut remarquer que le minimum est donné par la division qui se trouve à l'extrémité de l'index opposée au réservoir, tandis que le maximum est indiqué

par l'extrémité qui se trouve du côté opposé du réservoir. Ce tube est coudé près du réservoir, pour empêcher l'index de s'y introduire ; car il serait ensuite difficile de l'en faire sortir.

Pour installer l'appareil, on commence par ramener les index aux extrémités des colonnes thermométriques. Il suffit pour cela d'abaisser le côté gauche de la tablette qui porte les deux tubes ; les réservoirs étant à l'opposé l'un de l'autre, les index glissent jusqu'aux extrémités des colonnes.

Thermomètrographe de Six, perfectionné par Bellani. — Cet instrument donne en même temps le maximum et le minimum. Il consiste en un thermomètre à alcool renversé R*an* (*fig.* 814), dont le tube se recourbe en *n*, de manière à présenter deux branches verticales *an*, *nr*. Dans la partie inférieure de ce tube, il y a du mercure, qui s'élève jusqu'à l'extrémité de la colonne d'alcool dans la branche *na*. Au-dessus du mercure, dans la branche *nr*, il y a aussi de l'alcool, et dans le réservoir fermé *r* il y a de l'air, qui, par son élasticité, maintient constamment l'extrémité de la colonne de mercure de la branche *na* appuyée contre l'extrémité de la colonne d'alcool. Deux index en émail sont noyés dans l'alcool, de chaque côté ; ils portent un cheveu qui fait ressort et les empêche de glisser quand une fois ils ont été soulevés. On voit, au-dessus du point *n*, un de ces index figuré à part. La température est indiquée en même temps par les deux niveaux du mercure ; c'est pourquoi chaque branche porte une graduation. Supposons que les deux index s'appuient sur le mercure ; si l'alcool vient à se contracter en R, l'index sera soulevé par le mercure dans la branche *na*, tandis que l'index de l'autre branche restera en place. Si la température s'élève ensuite, le mercure abandonnera l'index de la branche *na* et soulèvera l'autre. On voit donc que ce dernier fera connaître la température maximum, et que l'autre indiquera le minimum. Pour installer l'instrument, on fait descendre les index jusqu'à la colonne de mercure, soit en imprimant de petites secousses, soit au moyen d'un aimant qui attire un brin de fil de fer renfermé dans chacun des index.

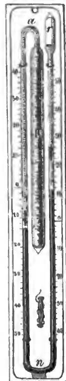


Fig. 814. — 1/3.

L'idée des index solides nous vient des académiciens de Florence, qui avaient imaginé un instrument analogue à celui que nous venons de décrire, seulement il était à peu près horizontal, l'extrémité qui contient le mercure étant un peu plus basse que l'autre.

Thermomètre à maximum de MM. Negretti et Zambra. — Dans cet instrument, on a évité, d'une manière ingénieuse, l'emploi d'un index solide. Un petit cylindre de verre est engagé, très près du réservoir, dans le tube

d'un thermomètre ordinaire à mercure, tube qui est un peu courbé en ce point pour que ce cylindre ne puisse se déplacer. L'instrument étant disposé horizontalement, si le mercure se dilate, le liquide passe autour du cylindre de verre, et la colonne s'allonge comme à l'ordinaire. Si la température s'abaisse ensuite, le mercure se contracte et tend à rentrer dans le réservoir ; mais l'obstacle qu'oppose le petit cylindre fait que la colonne se divise au point où il se trouve, et que le sommet de cette colonne ne se déplace que de la quantité tout à fait négligeable qui correspond à l'abaissement de température du mercure qu'elle contient. Le sommet de cette colonne indique donc le maximum. Si l'on redresse le thermomètre verticalement, les deux parties de la colonne se réunissent, et l'instrument est prêt à servir de nouveau.

1100. THERMOMÈTRES A DÉVERSEMENT. — Les instruments qui précèdent doivent être préservés de toute secousse qui pourrait déranger les index. On ne peut donc s'en servir avec sécurité pour observer à de grandes profondeurs, comme au fond de la mer, dans les puits artésiens ; car il est impossible de les faire descendre et de les remonter, sans leur imprimer quelques secousses. On se sert alors d'appareils *à déversement*, dont la première idée est due à Collardeau et à Cavendish, et dont le thermomètre à poids nous offre un exemple pouvant servir à indiquer les maximum.

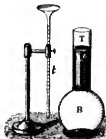


Fig. 815.

La *fig.* 815 représente un thermomètre à minimum sans index, imaginé par Gay-Lussac. Un ballon B portant un orifice capillaire *o*, recouvert par le mercure que contient le cylindre T, est rempli d'eau salée ou d'alcool, à une température connue T supérieure à celle que l'on veut observer. Si le liquide se contracte dans le ballon, du mercure s'y introduit, et n'en peut plus sortir quand la température remonte. A la fin de l'expérience, on extrait ce mercure et on le verse dans un tube gradué très étroit *t*, dont il occupe un certain nombre N de divisions. Pour déduire de là la température minimum, il faut savoir à combien de degrés correspond chaque division du tube *t*. Une expérience préalable, faite au moyen d'un abaissement de température connu, fournit cette donnée. Par exemple, si un abaissement de température de 10° a fait entrer dans le ballon une quantité de mercure capable d'occuper *n* divisions du tube *t*, il est évident que $\frac{1}{10}n$ correspond à 1° ; alors la température minimum cherchée sera $T - \frac{1}{10}nN$.

Thermomètre à maximum de M. Walferdin. — La tige de ce thermomètre à mercure est divisée en degrés arbitraires, et terminée par un bec *c* (*fig.* 816) renfermé dans un réservoir en verre S portant un renflement latéral ou panse, dans lequel il y a du mercure. On commence par remplir entièrement le tube de mercure, à une température connue *t* inférieure à celle que l'on veut observer ; ce que l'on obtient en faisant arriver la colonne, par dilatation,

jusqu'à l'extrémité *c*, et l'inclinant ensuite de manière que la pointe *c* plonge dans le mercure de réserve ; le thermomètre est alors *amorcé*. On le porte ensuite, après l'avoir placé verticalement, dans le milieu dont on veut obtenir la température ; du mercure sort du tube et tombe dans la panse S, en quantité qui dépend du maximum par lequel est passé l'instrument. On retire ce dernier et on le porte de nouveau à la température *t* ; le mercure ne remplit plus le tube, et s'il y a *n* divisions entre la pointe *c* et son niveau, on en conclura que le mercure sorti remplirait ces *n* divisions, et que la température cherchée est égale à *t* augmenté du nombre de degrés qui correspond à *n* divisions. Pour connaître la valeur d'une division en degrés, il suffit de porter l'instrument à une température connue, *t'*, moindre que *t* ; si le niveau se trouve à *n'* divisions au-dessous du bec *c*, $(t' - t) : n'$ sera la valeur d'une division en degrés, et alors $t + \frac{t' - t}{n'} n$ exprimera le maximum cherché.



Fig. 816.

On voit que, si l'instrument est amorcé à la température *t*, il fonctionne comme un thermomètre ordinaire pour toutes les températures inférieures.

Thermomètre à minimum. — La tige de ce thermomètre est terminée par une pointe effilée *o* (*fig.* 817), qui fait saillie dans le réservoir. Ce dernier contient du mercure et de l'alcool ; à l'extrémité opposée de la tige, il y a une ampoule à panse latérale *r* contenant de l'alcool et de l'air. On commence par porter l'instrument à une température inférieure de plusieurs degrés au minimum que l'on veut observer ; puis, renversant le tube, *r'*, de manière que la pointe *o* soit couverte de mercure, on élève un peu la température. Alors il entre une colonne de mercure dans le tube, et l'on observe le nombre de divisions qu'elle occupe à une température connue *t* supérieure au minimum que l'on veut obtenir ; on redresse ensuite l'instrument, et l'on procède aux expériences. Si la température s'élève, la colonne de mercure s'éloigne de la pointe *o* ; elle peut même entrer en partie dans le réservoir supérieur. Si ensuite la température s'abaisse, la colonne redescend jusqu'au point *o*, puis du mercure tombe en *o* à travers l'alcool, jusqu'à ce que la température cesse de s'abaisser. La colonne de mercure peut



Fig. 817.

ensuite remonter, et le nombre de divisions n dont sa longueur a diminué fait connaître l'abaissement de température au-dessous de $t°$.

Il reste à évaluer la valeur des divisions en degrés centigrades. Pour cela, on pousse une colonne de mercure dans le tube, à une température connue t'; on refroidit ensuite l'appareil jusqu'à t'', et l'on observe la quantité n' dont s'est raccourcie la colonne, par la sortie d'une partie du mercure. Alors $(t'-t'') : n'$ représente la valeur d'une division en degrés, et le minimum cherché est égal à $t - n\frac{t'-t''}{n'}$.

On peut opérer autrement : tout le mercure étant rassemblé dans le réservoir inférieur à une température supérieure au minimum cherché x, on renverse l'instrument et on le plonge dans le milieu à explorer. De l'alcool passe alors dans le réservoir à mercure. On redresse le thermomètre et on le porte à une température connue t supérieure à x. Alors du mercure monte dans le tube, et s'il occupe n divisions, c'est que la température t surpasse le minimum, du nombre de degrés qui correspond à n. On est ainsi conduit à la même formule que ci-dessus.

Les thermomètres à déversement servent principalement à prendre la température au fond de la mer et dans les puits artésiens. La forte pression qu'ils supportent à de grandes profondeurs les briserait, ou au moins en fausserait les indications en les comprimant. C'est pourquoi on les renferme dans des tubes très résistants en métal, fermés hermétiquement au moyen d'un bouchon à vis. Ce bouchon porte un anneau auquel on attache la corde destinée à remonter l'appareil; un autre anneau, placé à la partie inférieure du tube, est destiné à suspendre un boulet qui sert de lest.

1101. Thermomètrographes. — Les observations météorologiques sont singulièrement facilitées par l'usage des *thermomètrographes*, instruments qui enregistrent d'eux-mêmes leurs propres indications.

Thermomètre à pointage de M. Bréguet. — Cet appareil est représenté dans la *fig*. 818. r est un thermomètre métallique de A. Bréguet, dont l'aiguille e porte à son extrémité un petit tube vertical rempli d'encre d'imprimerie. A est une caisse dans laquelle se trouve un mouvement d'horlogerie, qui fait marcher une bande horizontale B sur laquelle sont tracés 24 arcs égaux. Ces arcs viennent se placer successivement au-dessous de la pointe de l'aiguille e, à la fin de chaque heure du jour. En ce moment, un ressort qui dépend de l'horloge, fait baisser brusquement la pointe de l'aiguille, qui vient alors marquer un point noir sur l'arc qui se trouve immédiatement au-dessous. La place de ce point sur l'arc fait connaître la position de l'aiguille, et par conséquent la température, à l'heure qui correspond au passage de cet arc sous la pointe.

M. Despretz a indiqué un *thermomètrographe* qui donne la température à chaque instant de la journée. Il consiste en une lame double ab (*fig*. 819) de fer et de cuivre, de 2 à 3^m de longueur, fixée à son extrémité supérieure a.

L'extrémité inférieure *b* se déplace à droite ou à gauche quand la température varie, à cause de l'inégale dilatation des deux métaux. Cette extrémité porte un crayon dont la pointe décrit alors une courbe qui diffère peu d'un arc de cercle. Une bande de papier *mn*, sur laquelle s'appuie la pointe du crayon, se meut verticalement au moyen d'un mécanisme d'horlogerie, de manière que le crayon trace une courbe dont les inflexions indiquent les variations de température. Une ligne verticale *ac* qui correspond à la position de la lame quand

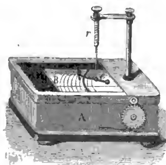

Fig. 818.



Fig. 819.

elle est rectiligne, sert de point de départ pour compter les longueurs horizontales, qui représentent les différences entre les températures et celle que possède la double lame quand elle est rectiligne.

On enregistre aussi les indications du thermomètre à mercure par la même méthode photographique que les hauteurs barométriques (I, 390). On emploie aussi des appareils électro-magnétiques, que nous décrirons plus tard.

1102. Montre-thermomètre. — M. J. Jürgensen a imaginé un appareil qui donne lui-même la moyenne des températures qui ont eu lieu pendant un temps donné. Il consiste en une montre dont le balancier est muni de doubles lames *a*, *a*, *a* (*fig.* 820) formées de platine et de cuivre, comme dans les chronomètres compensés (842), seulement le métal le plus dilatable est, ici, en dedans. Il résulte de là que si la température s'élève, les masses *n*, *n*, *n* s'éloignent de l'axe, et la montre retarde; elle avance, au contraire, quand la température baisse. On cherche, par tâtonnement, à quelle température *t* le balancier fait une oscillation par seconde, ou 86400 oscillations en 24 heures.

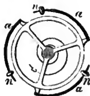


Fig. 820.

La différence entre le nombre des oscillations accomplies pendant un temps donné et le nombre de secondes qu'il contient, sert à calculer la différence entre la température moyenne pendant ce temps et la température *t*; car, chaque température agit, pour modifier le mouvement, proportionnellement à

sa durée et à son intensité. Une table construite par comparaison fait connaître à combien de degrés correspond un battement de plus ou de moins pendant un temps donné. On a fait de ces montres-thermomètres qui varient de 32^s, et même de 51^s, en 24 heures, pour une différence de température de 1°.

M. Ed. Becquerel a imaginé d'obtenir la température moyenne, par une méthode analogue, au moyen d'une horloge dont le mouvement est réglé par un pendule semblable aux pendules compensateurs (840), mais dont la disposition est renversée, de manière que les oscillations se ralentissent quand la température s'élève, et s'accélérent quand elle s'abaisse.

II. De la température de l'air en un même lieu.

1103. Manière d'observer la température de l'air. — Quand un thermomètre est exposé à l'air libre, ses indications dépendent de plusieurs circonstances accidentelles qui rendent les résultats incertains : la chaleur émise par le sol et les corps environnants, la reverbération des rayons solaires, le rayonnement du thermomètre lui-même vers les corps plus froids, vers l'espace, etc., sont autant de causes d'erreur. Il suffit souvent de déplacer l'instrument de quelques mètres, ou même de l'orienter différemment, pour que le niveau du mercure change de position. Pour obtenir des résultats comparables, il faut donc éliminer toutes les influences accidentelles, et s'attacher à observer la température de l'air, ce qui exige beaucoup de précautions.

Position du thermomètre. — Le thermomètre doit être placé à 2 mètres environ au-dessus du sol, à l'ombre et exposé au nord. Il ne doit y avoir au devant, ni édifices, ni arbres, ni aucun obstacle capable de renvoyer la chaleur du soleil. On dispose deux plateaux de bois horizontalement au-dessus et au-dessous de l'instrument, de manière qu'il ne voie ni le ciel ni la terre, et qu'il donne la température de la couche d'air dans laquelle il est plongé.

Quand on veut une grande précision, on attache le thermomètre à un cordon, et on le fait tourner comme une fronde. Il est évident que l'air se renouvelant sans cesse autour de l'instrument, l'effet du rayonnement sera très faible par rapport à celui que produira le contact de l'air. M. Bravais a reconnu que les températures obtenues par ce moyen sont inférieures pendant le jour à celles que donne un thermomètre fixe, et supérieures pendant la nuit; ce que l'on pouvait facilement prévoir. En général, le thermomètre fixe donne une température comprise entre celle du sol et celle du thermomètre agité.

Pour éviter les effets du rayonnement, M. Renou a imaginé de renfermer le réservoir du thermomètre dans un double tube noirci en dedans, et dans lequel on fait circuler l'air dont on veut obtenir la température. M. Viard, de son côté, a employé avec succès une disposition analogue : le thermomètre est placé au milieu de deux tuyaux concentriques ; l'air entre par le bas du plus étroit,

descend par l'espace qui les sépare, et se rend dans une caisse, d'où il sort par un tuyau en tôle dans lequel brûle une lampe qui produit un tirage. Si l'on change la vitesse du courant d'air, le thermomètre ne varie pas de $\frac{1}{16}$ de degré, ce qui montre qu'il indique bien la température de l'air.

A l'Observatoire de Kew, le thermomètre est placé dans une sorte de cage à jalousies qui le préserve du rayonnement des corps extérieurs, tout en permettant à l'air de circuler facilement autour de l'instrument. Enfin, le Congrès météorologique de Bruxelles, en 1853, et le conseil de la Société royale de Londres, ont engagé à observer simultanément plusieurs thermomètres doués de pouvoirs rayonnants différents, les uns couverts de noir de fumée, les autres argentés ou à surface vitreuse. Il est évident que si ces instruments sont d'accord, c'est qu'ils ne sont pas influencés par le rayonnement des corps environnants, et qu'ils donnent exactement la température de l'air.

1104. Températures moyennes. — Si l'on observe le thermomètre pendant 24 heures, en un lieu donné, à des intervalles de temps assez rapprochés pour que les changements soient peu étendus pendant chaque intervalle, et si l'on divise la somme des températures obtenues par le nombre des observations, on a la *température moyenne* du jour. Comme les variations sont assez lentes, il suffit d'observer d'heure en heure. Cette manière d'opérer est fort assujettissante; heureusement qu'on a reconnu que la moyenne obtenue coïncide avec celle qui serait donnée par trois observations seulement, faites l'une à *midi*, et les autres au *lever* et au *coucher* du soleil. Enfin, de Humboldt a reconnu, en discutant un grand nombre d'observations recueillies en Europe et sous l'équateur, que dans tous les climats et sous toutes les latitudes, la moyenne entre le *maximum* et le *minimum* coïncide, à quelques dixièmes de degré près, avec la moyenne du jour. On peut donc se contenter d'observer le thermomètre à maximum et à minimum. Cette méthode, suivie dans la plupart des observatoires, n'exige pas la présence de l'observateur à heure fixe. Aujourd'hui, l'usage des instruments enregistreurs rend la tâche encore plus facile.

Si l'on divise par le nombre des jours du mois, la somme des moyennes de tous les jours, on a la *moyenne mensuelle*. En divisant par 12 la somme des 12 moyennes mensuelles, on a enfin la *moyenne annuelle*.

Moyenne d'un lieu. — La moyenne annuelle n'est pas la même tous les ans en un même lieu; cependant les différences ne dépassent pas généralement 5 ou 6°. A Paris, pendant 30 ans, elles n'ont pas atteint 3°. Si l'on fait la somme des moyennes annuelles observées pendant un certain nombre d'années, et qu'on divise cette somme par ce nombre, on obtient la température moyenne du lieu, et avec d'autant plus d'exactitude qu'on embrasse un plus grand nombre d'années. Par exemple, à Paris, des observations poursuivies pendant 30 ans ont donné la moyenne 10°,67. Comme la différence la plus grande d'une année à l'autre n'atteint pas tout à fait 3°, il est évident que l'erreur sur la moyenne trouvée ne peut être de plus de $\frac{3}{30}$ ou $\frac{1}{10}$ de degré. Il faut au moins

10 années d'observations pour que les différences accidentelles entre les années successives puissent se compenser sensiblement, et qu'on puisse compter sur la moyenne obtenue.

1105. Marche diurne de la température en un même lieu. — La température change d'un moment à l'autre de la journée, à cause des variations de distance du soleil à l'horizon, tant au-dessus qu'au-dessous. Pour avoir une idée générale de la marche de la température pendant la journée, il faut se débarrasser de l'influence des saisons, et des variations accidentelles occasionnées par diverses causes, comme le degré de pureté de l'atmosphère, la présence des nuages, la direction du vent, la pluie, etc. Pour cela, on prend, pour chaque heure du jour, la moyenne des températures observées à cette heure pendant plusieurs années. On doit à Bouvard une série semblable d'observations faites pendant 16 ans, de 1816 à 1831, à l'Observatoire de Paris. Le thermomètre était consulté quatre fois : à 9 heures du matin, à midi, à 3 heures et à 9 heures du soir; en ajoutant à ces résultats le maximum et le minimum de chaque jour, on avait six observations. Les températures des autres heures étaient intercalées, au moyen de formules d'interpolation ou de constructions graphiques. La *fig.* 821 montre la loi générale de la marche de la température pendant 24 heures, à Paris. Les abcisses représentent les heures, et les ordonnées, les températures à l'échelle de 2mm par degré.

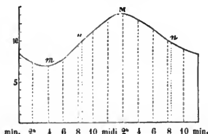


Fig. 821.

En prenant la moyenne des températures de toutes les heures, on trouve, pour la moyenne de Paris, 10°,67. Le minimum moyen est 7°,13; il a lieu à 4 heures du matin (*m*, *fig.* 821). Le maximum moyen, M, a lieu à 2 heures après midi; il est égal à 14°,47. On voit donc que l'air s'échauffe pendant 10 heures, de 4 heures du matin à 2 heures du soir. A partir de 2 heures, l'action du soleil sur le sol et sur les couches inférieures de l'atmosphère est trop faible pour compenser le refroidissement par rayonnement, et la température baisse jusqu'à 4 heures du matin, c'est-à-dire pendant 14 heures.

Si l'on prend la moyenne entre le maximum et le minimum, on trouve 10°,80, qui diffère à peine de la moyenne de Paris, 10°,67.

Enfin, à 8 heures 20m du matin et du soir (*n*, *n*, *fig.* 821), on trouve la température moyenne de l'année, 10°,67 ; d'où il résulte qu'on pourrait, pour obtenir cette moyenne, se contenter d'observer le thermomètre une fois chaque jour, à 8h 20m du matin ou du soir. Mais comme la température varie très rapidement quand on approche de l'heure qui donne la moyenne, on commet

des erreurs notables pour peu qu'on observe un peu trop tôt ou un peu trop tard. On pourrait aussi ne consulter le thermomètre qu'aux heures du maximum et du minimum, mais ce procédé ne donnerait pas le même résultat que l'emploi des thermomètres à index, parce que les époques du maximum et du minimum sont souvent déplacées de plusieurs heures par des causes accidentelles.

Il s'agit dans tout ce qui précède de la moyenne générale annuelle, sans distinction de mois ou de saisons. Si l'on considère à part les différents mois, on trouve que l'heure unique à laquelle il faut observer pour avoir la moyenne *mensuelle* change d'un mois à l'autre. A Paris, l'heure de la moyenne du matin, est pour janvier, 10 heures, et pour juillet, 7 heures. Les heures de la moyenne des autres mois sont intermédiaires entre ces deux-là. Les heures du maximum et du minimum éprouvent aussi des déplacements suivant les saisons; on peut dire, en général, que le *maximum* a lieu un peu avant 2 heures en hiver, et un peu après, en été. Le *minimum* se manifeste, dans nos climats, une demi-heure environ avant le lever du soleil, et quand cet astre est à 12° au-dessous de l'horizon, si l'on considère les résultats de toute l'année. Mais si l'on veut séparer les saisons, on trouve que le minimum se présente en hiver et en automne quand le soleil est à 18° au-dessous de l'horizon, et en été, quand il n'est qu'à 6°. A Paris, le minimum, qui se manifeste à 4 heures du matin quand on considère toute l'année, a lieu vers 6 heures en hiver, et vers 3 heures en été.

1106. Températures mensuelles. — Les climats dépendent tout particulièrement des variations de la température d'un mois à l'autre, et des maximum et minimum qu'on observe aux différentes époques de l'année.

Voici les résultats trouvés à Paris par Bouvard, pour les moyennes des différents mois, et leur maximum et leur minimum moyens; résultats calculés d'après 16 années d'observations :

MOIS.	MAXIMUM.	MINIMUM.	MOYENNE.
Janvier.	4°,0	— 0°,1	2°,0
Février.	6,8	1,2	4,0
Mars.	10,5	3,5	7,0
Avril.	15,2	6,1	10,7
Mai.	18,6	9,4	14,0
Juin.	21,8	12,1	17,0
Juillet.	23,4	13,9	18,7
Août.	23,0	13,7	18,2
Septembre.	20,1	11,4	15,8
Octobre.	15,2	7,8	11,5
Novembre.	9,4	4,5	7,0
Décembre.	5,8	2,0	3,9

En divisant par 12 la somme des moyennes mensuelles, on trouve pour moyenne de l'année, 10°,80. On arrive au même nombre en prenant la moyenne des maximum et des minimum.

La *fig.* 822 fait embrasser d'un seul coup d'œil les résultats consignés dans le tableau qui précède. Les températures sont représentées par les ordonnées, à l'échelle de 1mm pour 1°. Les courbes supérieure et inférieure passent par les extrémités des maximum et des minimum des différents mois, et la courbe tracée en points correspond aux moyennes mensuelles.

On voit que, pour Paris · 1° les mois les plus chauds de l'année sont juillet et août, dont les températures ne diffèrent que de quelques dixièmes de degré; le maximum moyen tombe le 26 juillet. 2° Le mois le plus froid est janvier; le minimum se présente vers le 15 de ce mois. 3° La différence entre le minimum et le maximum est plus grande dans les mois chauds que dans les mois froids, et, par conséquent, dans les jours chauds que dans les jours froids; ce qui s'explique facilement, le rayonnement de la terre vers l'espace étant d'autant plus prononcé pendant la nuit que la température est plus élevée pendant le jour. 4° La moyenne du mois d'avril se confond, à un dixième de degré près, avec la moyenne annuelle; et celle du mois d'octobre en diffère peu. Il résulte de cette dernière remarque, qu'il suffit, à Paris, pour obtenir la moyenne annuelle, d'observer la température, chaque jour du mois d'avril; mais il ne faut pas oublier qu'on ne pourra obtenir un résultat exact qu'autant qu'on prendra la moyenne des résultats obtenus ainsi pendant un assez grand nombre d'années, afin de faire disparaître les variations accidentelles que pourrait présenter la température moyenne de ce mois.

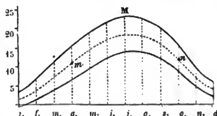


Fig. 822.

1107. Marche annuelle de la température. — L'inspection de la courbe des moyennes mensuelles *mn* (*fig.* 822) montre comment la température croît de janvier à juillet pour décroître ensuite. La loi paraît être sensiblement la même dans tout l'hémisphère nord; cela résulte des observations faites à des stations très éloignées les unes des autres: en Laponie, au golfe Persique, en Amérique. Cette marche de la température s'explique par les changements qui surviennent dans la durée des jours et des nuits, et dans la hauteur du soleil au-dessus de l'horizon à midi, changements dus eux-mêmes à l'inclinaison de l'axe de la terre sur le plan de l'écliptique. A partir de janvier, les jours croissent aux dépens des nuits, et la hauteur du soleil augmente. Ces changements sont d'abord lents; aussi n'est-ce que vers l'équinoxe que la température commence à croître notablement. Alors les jours devenant plus longs que les nuits, la perte de chaleur pendant la nuit est plus faible par rapport à la quantité

reçue pendant le jour. L'accroissement devient moins prononcé quand on s'approche du solstice d'été, qui a lieu du 20 au 21 juin, parce que les changements dans la hauteur du soleil et dans la durée des jours sont alors peu prononcés. Après le solstice, la température continue cependant à augmenter jusqu'au 26 juillet, la chaleur reçue étant toujours plus grande que celle qui se perd pendant la nuit. A partir de cette époque, la température baisse rapidement jusqu'au milieu de janvier.

Saisons météorologiques. — Le maximum et le minimum de la température annuelle n'ayant pas lieu à l'époque des solstices, les météorologistes ont généralement adopté une division de l'année en *saisons météorologiques*, différentes des saisons astronomiques. Le minimum de l'année ayant lieu vers le 15 janvier, ce jour est pris pour le milieu de l'*hiver*, qui se compose alors des mois de décembre, janvier et février. Le *printemps* est formé des trois mois suivants, l'*été* des mois de juin, juillet et août, et l'*automne* de septembre, octobre et novembre. Le *minimum*, le *maximum*, et la *moyenne* annuelle, qui tombe en avril et octobre, se trouvent ainsi placés vers le milieu des saisons.

1108. Variations non périodiques. — Moyennes de 5 jours. — Indépendamment des variations périodiques de la température, il y a à considérer, en un même lieu, des variations accidentelles que les moyennes ont pour objet de faire disparaître, et qui sont dues à diverses causes dont nous parlerons plus tard. Ces variations affectent souvent en même temps de vastes contrées du globe; on a remarqué aussi que des modifications en sens inverse se produisent le plus souvent, au même moment, dans d'autres régions aussi très étendues. Pour saisir ces fluctuations, les périodes mensuelles sont trop longues et les périodes diurnes trop courtes, les causes purement locales ayant par trop d'influence dans un aussi court délai. On a adopté, dans plusieurs observatoires, des *périodes de 5 jours* partant du 1er janvier. En comparant les moyennes de 5 jours obtenues dans un même lieu aux différentes époques de l'année, on pourra connaître les saisons où ces variations sont les plus fréquentes et les plus étendues. On pourra aussi, en comparant les résultats obtenus dans différents pays, connaître leur *variabilité comparative*, et calculer le coefficient de *disposition* à des variations irrégulières, qui ont tant d'influence sur la nature des climats.

III. Température de l'air à différentes latitudes.

1109. MOYENNES A DIFFÉRENTES LATITUDES. — La température moyenne aux différents points d'un même méridien va en diminuant à mesure qu'on s'éloigne de l'équateur; ce qui s'explique par la diminution de hauteur du soleil à midi au-dessus de l'horizon. Mais cette moyenne dépend aussi de diverses causes

qui font qu'elle n'est pas la même sur tous les points d'un même parallèle. En effet, si l'on fait passer une ligne par tous les lieux qui possèdent une même température moyenne, on trouve que cette ligne n'est pas une circonférence parallèle à l'équateur, et qu'elle est d'autant plus irrégulière qu'elle correspond à une température moyenne plus basse.

Lignes et bandes isothermes. — De Humboldt nomme *lignes isothermes* des courbes tracées sur la surfabe du globe, passant par tous les points qui ont même température moyenne. Il appelle *bande* ou *zone isotherme*, l'espace compris entre deux courbes isothermes. C'est en 1817, dans un travail remarquable

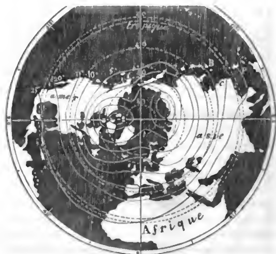


Fig. 823.

qui a fait époque dans la météorologie, qu'il est parvenu le premier à construire des lignes isothermes dans notre hémisphère, en discntant les observations recueillies jusqu'alors dans différents pays[1]. Depuis, le nombre de points où l'on a observé s'est considérablement accru; si bien que M. Mahlmann a pu calculer les moyennes des observations faites en 305 stations, prises dans toutes les parties du monde. Profitant des nombreuses données rassemblées de tous côtés, M. Kaemtz, en 1831, a repris le travail de De Humboldt, et a trouvé des lignes isothermes qui se confondent, sauf en quelques points, avec celles de son devancier[2].

La *fig.* 823 montre les conrbes isothermes de 25°, 20°, 15°, 10°, 5°, 0°,

[1] *Mémoires de la Société d'Arcueil*, t. III, p. 462.

[2] *Cours de météorologie* de M. Kaemtz, traduction française, p. 175 et suiv.

— 5°, — 10°, et — 15° ; les quatre premières sont interrompues dans le grand Océan. En comparant ces courbes aux parallèles de 20°, 40°, 60°, et 80° de latitude, on voit facilement qu'elles s'éloignent des pôles, dans l'Asie et dans l'Amérique. Ce sont donc des continents plus froids que l'Europe et que le grand Océan. A partir de l'isotherme de 5°, on voit se dessiner deux inflexions qui tournent leur convexité vers le pôle. Ces inflexions se prononcent de plus en plus, de manière que la courbe tend à prendre la forme d'un 8; puis, elle se sépare en deux parties distinctes, de manière à envelopper deux points voisins des pôles, où la température moyenne est plus basse que partout ailleurs, sans excepter le pôle terrestre.

Pôles du froid. — On a admis pendant longtemps qu'il existait dans notre hémisphère un seul *pôle glacial*, c'est-à-dire un seul point présentant un minimum de température moyenne. Ce point était placé entre l'île Melville et le pôle géographique, à peu près à égale distance de l'un et de l'autre. Mais, depuis qu'on a reconnu que les lignes isothermes se dépriment et finissent par se diviser en deux systèmes de courbes fermées, il a fallu renoncer à cette opinion. Brewster, le premier, a admis l'existence de deux pôles du froid, situés au nord de l'Amérique et de l'Asie. M. Kaemtz place l'un au nord du détroit de Barow, en Amérique, et l'autre en Sibérie, à l'est du cap Taymour. Sur la *fig.* 823, on reconnaît facilement la position de ces points, à l'inspection des courbes isothermes qui les entourent. D'après M. Berghauss, la température moyenne du premier serait de — 19°, et celle du second de — 17°. Ces nombres sont, du reste, fort incertains, de même que les positions des pôles du froid ; on conçoit, en effet, qu'on n'a pu faire d'observations suivies, dans ces régions glacées, où les plus intrépides voyageurs ne peuvent séjourner qu'au péril de leur vie.

Quant à la température moyenne du pôle géographique, elle n'a pu être observée directement, et les valeurs que lui assignent divers physiciens diffèrent notablement les unes des autres. Ce qui est certain, c'est que cette température n'est pas la plus basse, comme on l'a cru longtemps. Ainsi, Parry, qui a séjourné pendant 10 mois à l'île Melville, y a trouvé une température moyenne de —18°,5 ; les extrêmes ont été — 47° et +15°6. Tandis que W. Scoresby, plus près du pôle, sous le 78ᵉ degré de latitude, n'a trouvé que 8° à — 9°. On a donc pu dépasser les points les plus froids de l'hémisphère boréal. C'est par le nord de l'Europe, et en suivant à peu près le méridien de Paris, pour éviter les pôles du froid, qu'on peut espérer d'atteindre le pôle géographique.

Equateur thermal. — De Humboldt fixe à 27°,7 la température moyenne de l'équateur. Mais les observations sur lesquelles il s'appuie ont été faites aux bords de la mer. Dans l'intérieur des continents, on trouve une moyenne plus élevée. M. Douville a trouvé 32° au Congo ; M. Boussingault a conclu de ses observations dans différentes parties des Andes, une moyenne de 28° : dans l'intérieur de l'Afrique, on a trouvé 29°. On voit donc que l'équateur géographique n'est pas une ligne isotherme. On nomme *équateur thermal*, la ligne

isotherme dont la température moyenne est la plus élevée. M. Berghauss a reconnu qu'elle s'élève de quelques degrés vers le nord, dans l'intérieur de l'Afrique, et coupe la ligne équinoxiale en deux points opposés situés, l'un dans l'île de Sumatra, et l'autre sur la côte du Pérou ; d'où l'on peut conclure qu'elle redescend vers le sud dans le grand Océan. Au reste, la configuration de l'équateur thermal est mal connue, à cause du trop petit nombre d'observations, et de l'incertitude qui règne sur l'exactitude de la plupart d'entre elles.

1110. Températures sur un même méridien. — La température moyenne va en diminuant sur les divers méridiens, suivant des lois différentes, puisque les isothermes ne se confondent pas avec les parallèles. Pour donner une idée de la loi de cette diminution, nous avons représenté (*fig.* 824) les températures moyennes aux différentes latitudes du méridien qui traverse l'Asie et l'Amérique, méridien qui paraît présenter une température moyenne intermédiaire à celles du demi-méridien le plus chaud qui traverse l'Afrique, et du demi-méridien le plus froid, qui traverse le grand Océan. Les latitudes sont comptées sur l'axe horizontal, et les températures sur les verticales, à l'échelle de 1^{mm} par degré. En France, il faut s'avancer de 185200^{m} vers le nord pour trouver une diminution de 1°.

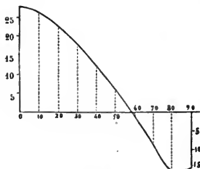


Fig. 824.

Zones isothermes. — Les météorologistes partagent généralement la surface du globe en *sept zones isothermes*, de la manière suivante :

1 *Zone torride*, ou *équatoriale*. . . .	de	30°	à	25°
2 *Zone chaude*.	de	25	à	20
3 *Zone douce*.	de	20	à	15
4 *Zone tempérée*.	de	15	à	10
5 *Zone froide*..	de	10	à	5
6 *Zone très froide*.	de	5	à	0
7 *Zone glaciale*, ou *polaire*.	de	0	à	— *t*

1111. MOYENNES HIBERNALE ET ESTIVALE. — La nature d'un climat ne dépend pas seulement de la température moyenne, mais encore de la plus basse et de la plus élevée. Par exemple, avec une même moyenne, les hivers peuvent être très doux, ou assez rigoureux pour faire périr certaines espèces animales ou végétales, et les étés très chauds, ou trop modérés pour que certains fruits puissent mûrir. Par exemple, à Paris, avec une moyenne de plus de 10°, le

raisin ne donne qu'un vin à peine potable, tandis qu'à Astrakhan, sur la mer Caspienne, tous les fruits sont exquis, et cependant la moyenne n'est que de 9°. Il est donc important de considérer séparément les températures moyennes de l'hiver et de l'été.

Si l'on fait passer des lignes par les points qui possèdent les mêmes moyennes hibernales, on obtient ce que de Humboldt appelle des lignes *isochimènes*. Il nomme lignes *isothères*, des lignes qui passent par les points qui ont la même moyenne estivale. Les courbes isothéres et isochiménes, beaucoup plus irréguliéres et moins connues que les lignes isothermes, ne leur sont pas parallèles, et peuvent même les couper.

Lignes isochimènes. — Ces lignes sont importantes à considérer, en ce qu'elles forment la limite géographique de certains végétaux : par exemple, l'olivier ne dépasse pas l'isochimène de 5° ; celle de — 1° à 1° sert de limite au hêtre, au mûrier et au châtaigner. On peut dire, en général, que les lignes isochimènes descendent à travers l'ancien continent de l'ouest à l'est, en formant avec les paralléles des angles trés ouverts. La ligne de — 1° à + 1° passe à Uleaborg (Norvége), Berlin, Bade, Sébastopol et Pékin ; elle descend ainsi de 21° de latitude, de Uleaborg à Pékin. A égale latitude, les hivers sont donc beaucoup plus froids en Chine que dans la partie occidentale de l'Europe, où les eaux de la mer s'enfoncent profondément dans les terres. Dans l'Amérique septentrionale, on a remarqué un fait analogue. Sous la même latitude, les contrées situées à l'ouest des monts Apalaches supportent des hivers plus rigoureux que celles de l'est qui sont plus prés de la mer. Les étés sont aussi plus chauds du côté de l'ouest.

Lignes isothères. — Ces lignes sont beaucoup plus irréguliéres que les autres, et encore moins connues. En Europe, elles semblent être dirigées à peu prés suivant les méridiens : ainsi, la moyenne estivale est à peu prés la même à Lisbonne et à Christiana, dont les latitudes différent de 19 degrés. Si l'on marche vers l'est, on trouve des bandes isothéres, dirigées du nord au sud, dans lesquelles la moyenne estivale est sensiblement constante. Cette moyenne va en augmentant d'une bande à l'autre, jusque vers le milieu de l'ancien continent. Cette même augmentation se montre de nouveau quand on s'approche de l'extrémité orientale de l'Asie.

Comme les lignes isochiménes qui traversent l'Europe se rapprochent rapidement de l'équateur quand on marche vers l'est, on voit que la différence entre les étés et les hivers est d'autant plus grande qu'on s'approche davantage du milieu de l'ancien continent et de l'équateur. Voici quelques exemples pris à peu prés sur la même latitude :

Eté..................	19°,2	22°,8	21°,1	21°,8
Hiver................	4°,7	2°,2	— 0°,6	— 3°,4
Différence.............	14°,5	20°,6	21°,7	25°,2

On peut dire, en général, que, sur un même méridien, la différence entre les moyennes estivale et hibernale est d'autant plus grande que la moyenne annuelle est plus basse. La différence est encore plus prononcée quand, au lieu de considérer les moyennes de l'été et de l'hiver, on considère celles du mois le plus chaud et du mois le plus froid. Ces résultats s'expliquent par l'augmentation de la différence de durée entre les jours et les nuits, à mesure qu'on s'avance vers le pôle. Enfin, on remarque que la différence entre les saisons, est moins prononcée près des points où les courbes isothermes se relèvent vers le nord, que près des points où elles s'avancent vers l'équateur.

1112. Température de l'hémisphère austral. — On ne possède qu'un très petit nombre d'observations dans l'hémisphère austral. On a reconnu cependant que l'isotherme de 5° coupe l'Amérique à la latitude de 55°, vers le détroit de Magellan. C'est aussi à la latitude de 55° que l'isotherme de 5° coupe l'Amérique du nord. Au cap de Bonne-Espérance, la température moyenne est plus basse de 3° que dans l'hémisphère boréal, à égale distance de l'équateur. Les eaux de l'Océan austral sont aussi plus froides que celles des mers du nord, à égale latitude. On admet assez généralement que l'hémisphère austral est plus froid que l'autre, mais ce point n'est pas parfaitement établi. Il paraît certain du moins que dans le premier, dont l'Océan recouvre presque toute la surface, les étés sont moins chauds que dans l'autre, quoique la terre soit plus près du soleil quand l'hémisphère austral est dans l'été, que lorsque cette saison arrive pour l'hémisphère boréal. Les hivers sont aussi plus doux dans le premier hémisphère.

1113. Températures extrêmes. — Il nous reste à considérer les températures extrêmes qui se produisent pendant l'année, et qui forment un élément très important du climat. En effet, un froid intense, ne durât-il que quelques jours, peut suffire pour faire périr certaines plantes, et en rendre la culture impossible. Ces températures extrêmes peuvent être considérées soit d'une manière absolue, c'est-à-dire avec la valeur très variable qu'elles présentent chaque année, soit en moyenne, c'est-à-dire qu'on peut prendre la moyenne des températures les plus basses observées pendant plusieurs années, ou des températures les plus élevées. M. Saigey[1] a formé le tableau suivant, en comparant les résultats moyens obtenus à différentes latitudes :

Températures moyennes...	30°	20°	10°	0°	—10°	—20°	—23°
Maximum	48	44	34	26	19	12	9
Minimum..............	12	—4	—14	—26	—36	—52	—57
Variations totales.......	36	42	48	52	58	64	66

On voit que les extrêmes sont d'autant plus écartés l'un de l'autre que la

[1] *Petite physique du globe*, t. I, p. 63.

température moyenne est plus basse, c'est-à-dire la latitude plus élevée, résultat analogue à celui que nous avions déjà remarqué relativement aux moyennes hibernales et estivales (1111).

La plus forte chaleur qu'on ait notée sur la surface du globe a été supportée par Lyon et Ritchie à l'oasis de Mourzouck; ils virent le thermomètre atteindre à 54°. Burckard l'a vu monter à 47°,4, à Esné, dans la haute Egypte, par un chamsin, vent chaud venant du centre de l'Afrique. Les plus grands froids ont été observés vers le pôle nord. Le mercure y reste quelquefois gelé pendant plusieurs semaines; ce qui suppose un froid de — 40° au moins. Parry a vu le thermomètre descendre jusqu'à — 50°, et Black, au nord de l'Amérique, a supporté un froid de — 56°,7. C'est la température la plus basse qu'on ait observée. L'écart entre les extrêmes, 54° et — 56°,7, est de 110°,7.

A Paris, la chaleur extrême a été, en moyenne, depuis le commencement de ce siècle, de 32°,8, et le froid extrême de — 10°,5. Quant aux extrêmes absolus, la plus haute température a été de 38°,4, le 8 juillet 1793; et la plus basse de — 22°,5, le 31 décembre 1788.

Quand il s'agit d'apprécier les effets du maximum et du minimum sur la végétation, il ne suffit pas d'en connaître les valeurs, mais il faut encore savoir combien de temps ces températures extrêmes ont duré. C'est ainsi qu'un froid vif, mais qui ne dure que quelques instants, à la fin de la nuit, peut n'être pas préjudiciable aux plantes qui n'en ressentent l'influence que dans les organes superficiels; tandis qu'un froid moins vif, mais qui dure plusieurs heures, peut les faire périr. Flangergues avait imaginé d'apprécier la durée du froid pendant la nuit, en observant l'épaisseur de la glace formée sur l'eau; il avait même imaginé un instrument nommé *kruomètre*, destiné spécialement à ces sortes d'observations. De Gasparin arrive au même but au moyen d'un simple vase rempli d'eau, exposé à l'air et abrité sur les côtés par des nattes en paille. L'épaisseur de la glace formée, épaisseur qui ne dépend pas seulement du minimum, mais aussi de sa durée, donne une idée de la « *somme de froid* » éprouvée par les plantes.

1114. CLASSIFICATION DES CLIMATS. — On a distingué les climats les uns des autres non seulement d'après la température moyenne, mais encore d'après l'écart des températures extrêmes. Déjà Hippocrate, dans son *Traité des airs, des eaux et des lieux*, semble distinguer les climats en *uniformes* et *variables*. Buffon a désigné sous le nom de *climats excessifs* ceux dans lesquels les extrêmes diffèrent beaucoup. Quand la différence est modérée, on a un *climat variable*; et un *climat uniforme* ou *constant*, quand la différence est faible. Par exemple, Paris possède un climat variable; la différence entre la moyenne du mois le plus chaud, 18°,01 et celle du plus froid, 3°,59, est de 14°,42. Les climats de New-York et de Pékin sont excessifs, la différence entre le mois le plus chaud et le plus froid étant de 30°,8 et 33°,2. Il en est de même de Pétersbourg, Moscou, Jakouzk; les différences entre les moyennes estivale et hibernale sont 23°,6; 27°,7; 56°,1. Les îles Feroe et Shetland jouissent d'un

climat constant, car les différences entre les moyennes estivales (11°,6 et 11°,9) et les moyennes hibernales (3°,9 et 4°) ne sont que de 7°,7 et 7°,9.

Nous allons voir que les climats constants appartiennent aux îles basses et aux côtes, et les climats excessifs, à l'intérieur des continents. De là la division, généralement adoptée par les météorologistes, des climats en *climats marins* et *climats continentaux*.

1115. Des causes qui modifient les climats. — Les irrégularités des courbes *isothermes*, *isochimènes* et *isothères*, montrent que les climats ne dépendent pas seulement de la latitude. Ils sont influencés par l'étendue relative des mers et des terres, la direction et la configuration des côtes plus ou moins découpées, le relief des continents, la direction des chaînes de montagnes, les vents régnants, les courants de la mer, la nature du sol, la végétation qui le recouvre, etc.

Si la surface de la terre était unie et partout identique, la distribution de la température ne dépendrait que de la latitude; mais il n'en est pas ainsi. On peut dire, en général, que le voisinage des grandes masses d'eau élève la température moyenne et rapproche les extrêmes; les climats sont donc plus uniformes dans les points où les lignes isothermes s'avancent vers le nord. Ce résultat s'explique facilement : les rayons solaires pénètrent à une certaine profondeur dans la mer et échauffent une couche d'eau assez épaisse, de manière que la température ne s'élève pas beaucoup à la surface, pendant l'été. D'un autre côté, la température de l'eau s'abaisse peu pendant l'hiver, parce que la faible chaleur de la surface s'étend à une grande profondeur. Or, l'air en contact avec la mer tend à en prendre la température; et il en est de même de l'air des îles basses, et des côtes qui présentent un grand nombre de golfes. — Les vents de mer adoucissent le froid pendant l'hiver, et diminuent la chaleur pendant l'été. Ainsi, les vents d'ouest, qui soufflent très fréquemment, surtout pendant l'hiver, donnent aux côtes occidentales des deux continents un climat plus égal que celui des côtes orientales. De plus, ces vents humides n'activent pas l'évaporation, qui est une cause de refroidissement; et, en précipitant leur vapeur, pendant l'hiver, ils forment une brume qui empêche le refroidissement par rayonnement vers l'espace.

Sur les continents, au contraire, dans les parties éloignées de la mer, la transparence de l'atmosphère, qui favorise à la fois l'irradiation solaire et le rayonnement vers l'espace, l'accumulation de la chaleur dans les couches superficielles du sol qui s'échauffent considérablement et se refroidissent de même, rendent les climats excessifs.

Ces considérations, développées pour la première fois par L. de Buch, nous expliquent pourquoi l'Europe, dans laquelle on remarque de nombreuses mers intérieures et des golfes multipliés, possède un *climat marin*, surtout sous le méridien du mont Blanc, qui rencontre relativement le moins de terre. A partir de ce méridien, les extrêmes se séparent un peu quand on marche vers l'ouest, et de plus en plus quand on s'avance vers l'est. Ainsi, le climat de la Chine

est *excessif*; à Pékin, où la température moyenne est la même qu'en Bretagne, l'été est plus chaud qu'au Caire, et l'hiver aussi rigoureux qu'à Upsal. En remontant vers le nord de l'Asie, on trouve à Irkoutsk sur la Léna, et à Tobolsk et Barnaul sur l'Obi, les mêmes étés qu'à Cherbourg, Berlin et Münster; le thermomètre se maintient des semaines entières à 30° et 31°, mais les hivers présentent une température moyenne de —18° à —20. L'adoucissement du froid quand, après avoir dépassé le pôle glacial, on s'approche du pôle géographique, s'explique par l'existence d'une mer libre et profonde, reconnue par le capitaine Weddel, et qui paraît s'étendre jusqu'au pôle, à partir de la latitude des nouvelles Orcades et des nouvelles Shetland.

Dans l'Amérique septentrionale, on remarque des faits analogues, et particulièrement la différence de climat des côtes occidentales et orientales. Ainsi, tandis que la nouvelle Californie jouit d'un climat uniforme, la partie orientale des Etats-Unis possède un climat excessif. Du reste, les excès des températures moyennes de l'Europe occidentale sur celles de l'Amérique orientale, à égalité de latitude, vont en augmentant quand on s'avance vers le nord : par exemple, les moyennes sont à peu près les mêmes au Caire et à Saint-Augustin (Floride), et il y a une différence de 3°,8 entre celles de Naples et de New-York ; de 7°,7 entre celles de Bordeaux et d'Halifax ; de 11°,5 entre celles de Gothenbourg et de Nain, dans la Floride.

L'état climatologique des pays voisins de la mer est aussi dû, en partie, à certains courants marins qui apportent vers les côtes, notamment vers les deux rives de l'Atlantique, des masses d'eau échauffées par le soleil de l'équateur. Ces courants tendent à élever la température des côtes de l'Europe occidentale, ainsi que de quelques points des côtes orientales de l'Amérique. Nous reviendrons sur les directions de ces courants (1132).

1116. Climats locaux. — Indépendamment des climats qui s'étendent sur de vastes contrées, on remarque des *climats locaux* qui affectent des régions peu étendues, et qui se distinguent du climat général de la contrée où ils se rencontrent. Les caractères particuliers de ces climats dépendent de circonstances locales, comme la nature du sol, l'état de la culture, l'étendue des forêts; la direction et la configuration des vallées donnant lieu à certains vents, le voisinage des montagnes et leur orientation; l'existence de lacs, de cours d'eau, de marécages. Ces influences locales impriment aux courbes des températures moyennes et extrêmes, une foule de petites sinuosités irrégulières que l'on néglige quand on cherche la direction générale de ces lignes à la surface du globe.

Partout où règnent des vents chauds et humides, la température s'élève; les vents secs et froids la font, au contraire, baisser. Les marécages sont une cause de refroidissement, par l'évaporation abondante dont ils sont le siége; et, dans les latitudes élevées, par la glace qu'ils conservent jusqu'au milieu de l'été. Quant aux forêts, il semble qu'elles rendent les climats plus irréguliers, car on a observé en Amérique, que le déboisement a rapproché les extrêmes

de température et a probablement un peu élevé la moyenne. Les forêts refroidissent les contrées qu'elles recouvrent, en interceptant les rayons solaires, en augmentant la surface rayonnante, et parce qu'il se fait une active évaporation à la surface des feuilles. De plus, elles arrêtent les vents de mer et les empêchent de pénétrer dans l'intérieur des continents.

IV. Température de l'atmosphère à différentes hauteurs.

1117. Décroissement de la température à mesure qu'on s'élève. — C'est un fait connu de toute antiquité, que la température s'abaisse à mesure qu'on s'élève au-dessus de la surface de la terre. Les observations faites sur les hautes montagnes, les neiges perpétuelles qui couronnent leur sommet, ont mis cette loi en évidence. On l'a souvent vérifiée depuis l'invention des aérostats; Gay-Lussac, parti de Paris, lors de son célèbre voyage aérien, avec une température de 30°,7, a trouvé — 9°5 à la hauteur de 6977^{m}; ce qui fait une différence de 40°,2.

Causes du froid des hautes régions de l'air. — La chaleur que reçoit l'atmosphère vient du soleil; une partie des rayons de cet astre la traverse et parvient à la surface du sol, l'autre est absorbée par l'air et sert à l'échauffer; mais la proportion absorbée est d'autant plus petite que l'air est plus pur et moins dense. Les couches supérieures de l'atmosphère s'échauffent donc peu, tandis que les couches inférieures, plus denses et généralement moins pures, absorbent une bien plus grande proportion de chaleur. En outre, les rayons qui arrivent à la surface de la terre en élèvent notablement la température; cette surface échauffe par son contact l'air qui la recouvre, et émet à travers l'atmosphère des rayons de chaleur obscure pour lesquels l'air est moins diathermane que pour les rayons lumineux (733). Ces rayons obscurs sont donc absorbés en grande quantité par les couches inférieures avant de parvenir aux couches plus élevées. Les premières s'échauffent donc de trois manières : par l'absorption des rayons directs du soleil, par le contact du sol échauffé, et par l'absorption des rayons obscurs émis par la surface de la terre; on voit qu'il se produit là un effet analogue à celui que l'on observe dans la chambre de Saussure (824).

Les couches inférieures échauffées et dilatées tendent à s'élever en vertu de leur légèreté spécifique, et à transporter ainsi de la chaleur dans les régions supérieures. Mais il faut remarquer que ces couches, en montant, sont soumises à des pressions décroissantes, et par conséquent se raréfient, ce qui les refroidit (1041). Du reste, ces mouvements n'ont lieu que tout près de la surface de la terre, quand le soleil échauffe fortement le sol; et il est facile de voir qu'ils n'ont pas lieu dans l'ensemble de l'atmosphère. En effet, il suffit, pour qu'il y ait équilibre stable, que les couches aillent en diminuant de densité

de bas en haut ; ce qui dépend à la fois de leur température et de leur pression. Si nous supposons que le sol soit à 25°, et que la température de l'air diminue de 1° pour 30m d'élévation, la couche d'air inférieure échauffée à 25° ne pourra s'élever ; car, pour qu'elle monte de 30m, il faudrait que sa densité fût moindre que celle de la couche d'air qui se trouve à cette hauteur. Or, si nous désignons par 1 la densité à 0° sous la pression de 760mm, la densité de la couche à 25°, sous la même pression, sera $\frac{273}{273+25} = 0{,}916$. La densité de la couche située à 30m de hauteur, dont la température n'est que de 24°, serait de $\frac{273}{273+24}$ si la pression était la même ; mais comme la pression diminue à peu près de 1mm pour une élévation de 10m,5 (I, 396), ce qui fait 2mm,86 pour une hauteur de 30m, la densité ne sera que $\frac{273}{273+24} \cdot \frac{760}{760-2{,}86} = 0{,}909$, un peu plus faible que celle de la couche à 30°. Il n'y a donc pas de raison pour que celle-ci s'élève et vienne prendre la place de l'autre.

Froid des hautes montagnes. — Le refroidissement des montagnes s'explique autrement que celui de l'air. Les sommets élevés rayonnent vers l'espace dans une infinité de directions à travers une atmosphère rare et pure, d'une épaisseur moindre que dans les plaines, et d'un très grand pouvoir diathermane. De plus, il n'y a pas, comme au-dessus des régions basses, une couche atmosphérique échauffée qui rayonne vers la terre la chaleur qu'elle a absorbée. Il est vrai que si les couches d'air qui règnent au-dessus des montagnes laissent facilement sortir les rayons émis par le sol, elles laissent aussi passer facilement les rayons solaires (1096) ; mais l'excès d'intensité de ces derniers rayons ne compense pas l'excès de déperdition de ceux qui partent du sol, puisque c'est surtout pour les rayons obscurs que la différence de diathermanéité de l'air des plaines et des montagnes est sensible. M. Ch. Martins, qui a publié un bon travail sur ce sujet [1], ajoute à ces causes de refroidissement l'ascension des couches d'air le long des flancs des montagnes, et leur refroidissement à mesure qu'elles s'élèvent. Aussi, peut-il arriver, pour les plateaux élevés et éloignés des sommets isolés, que la température soit plus basse sur ceux qui sont à une moindre hauteur. Par exemple, de Humboldt a trouvé dans les villes de Popayan, Mexico, Bogota et Quito, qui sont situées sur des plateaux élevés de 1769m, 2277m, 2660m et 2907m au-dessus de la mer, des températures de 20°, 17°, 16° et 15°. — M. Saigey considère comme une des causes du refroidissement des montagnes, l'évaporation abondante qui se fait à leur surface, dans un air très raréfié. M. Ch. Martins a particulièrement insisté sur cette cause, et c'est à la vapeur abondante qui se dégage, et qui se condense bientôt dans l'air froid, que sont dus ces brouillards qui s'élèvent des flancs des montagnes quand ils sont très humides, et qui forment ce que Peltier a appelé le *fumage* des montagnes.

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. LVIII, p. 503.

1118. Loi du décroissement de la température à mesure qu'on s'élève. — Cette loi est très importante à connaître pour le calcul des réfractions astronomiques, et pour établir la formule qui sert à mesurer les hauteurs au moyen du baromètre (I, 398). Jusqu'à 3000^m de hauteur, l'abaissement de température est à peu près proportionnel à la hauteur; mais au-delà, cette loi ne peut plus être admise. La meilleure série d'observations sur ce sujet a été faite par Gay-Lussac en 1804, lors de son voyage aérostatique; il observa le thermomètre à 20 hauteurs différentes, et, arrivé à 6977^m, il trouva une différence de 40°,2 sur la température à Paris au même moment. D'où l'on conclut un abaissement de 1° pour 173^m d'élévation, en admettant que le décroissement de température soit uniforme.

Presque toutes les autres séries que nous possédons ont été faites sur les montagnes; or, il paraît certain que la température de l'air sur les montagnes est plus basse que celle des couches atmosphériques à la même hauteur; c'est pour cela que le voisinage des hautes chaînes rend les climats plus rigoureux. Il faut, du reste, dans ces sortes d'observations, choisir autant que possible des pics isolés, autour desquels l'air puisse circuler librement.

Parmi les observations les plus remarquables, nous citerons celles de de Saussure, au sommet du mont Blanc, où il trouva — 2°,25, tandis que le thermomètre marquait 24° à Chamounix, et 28° à Genéve, à 4372^m plus bas. D'où l'on conclut un abaissement de température de 1° pour une élévation de 144 mètres. De Humboldt a trouvé 191 mètres pour 1° sur différents sommets des Andes, et 218^m dans son ascension au Chimborazo, où il est parvenu à 5876^m au-dessus de la mer. Ramond a trouvé, dans les Pyrénées, 148^m; M. Martins, 144^m sur le mont Ventoux; M. Kaemtz, 149^m sur le Rigi..... Les différences entre ces divers résultats ne proviennent pas seulement de ce que la température est plus basse sur les montagnes qu'à la même hauteur au-dessus des plaines, et de ce qu'elle est influencée par la forme de la montagne et l'état de sa surface, mais surtout de ce que le décroissement de la température dépend de l'heure du jour, de la saison, et de la latitude du lieu d'observation, comme nous le verrons bientôt. Quand on veut se contenter d'une première approximation, on peut admettre, en nombre rond, 180^m par degré dans nos climats, et 200^m sous l'équateur.

1119. Relation entre la température et la pression à différentes hauteurs. — L'intérêt majeur qu'ont les astronomes à connaître la loi du décroissement de la température jusqu'aux limites de l'atmosphère, a engagé les géomètres à soumettre la question au calcul. Mais on n'a disposé d'abord que d'un petit nombre d'observations, et aucune n'avait été faite pendant la nuit, qui est le temps où l'on observe principalement les astres. De plus, la plupart des géomètres ont admis que l'atmosphère n'avait pas de limite, et que les couches supérieures étaient indéfiniment refroidies; hypothèses qui les ont conduits à des résultats inadmissibles. Ils ont cependant reconnu que la

diminution de la température avec la hauteur n'est pas uniforme, et ils ont alors cherché une relation entre la température des couches atmosphériques et leur pression. M. Saigey [1], en combinant toutes les observations connues, est arrivé, de la manière suivante, à une relation fort simple entre ces deux éléments.

Supposons qu'on descende du haut de l'atmosphère, où la pression est nulle, à la surface de la terre où la température soit de 30° et la pression de 760mm, et qu'on note la température toutes les fois qu'on trouve une augmentation de pression de 50mm ; admettons enfin que la température de la dernière couche atmosphérique soit de — 62° (nous verrons plus loin comment on arrive à ce nombre), on formera le tableau suivant :

PRESSIONS.	TEMPÉRATURES.	DIFFÉRENCES.	PRESSIONS.	TEMPÉRATURES.	DIFFÉRENCES.
0mm	—62°,0		400mm	—1°,7	
		9°,0			5°,7
50	—53,0		450	4,0	
		8,6			5,3
100	—44,4		500	9,3	
		8,2			4,9
150	—36,2		550	14,2	
		7,7			4,4
200	—28,5		600	18,6	
		7,3			4,0
250	—21,2		650	22,6	
		6,9			3,6
300	—14,3		700	26,2	
		6,5			3,2
350	—7,8		750	29,4	
		6,1			
400	—1,7		760	30,0	

On voit que la température n'augmente pas uniformément comme la pression, puisque les différences ne sont pas égales entre elles. Mais si l'on retranche chacune de ces différences de celle qui la précède, on trouve sensiblement le même excès 0°,4. Les températures varient donc en progression arithmétique dont la raison est 0°,4, quand les pressions varient en progression arithmétique dont la raison est 50mm.

M. Saigey, en s'appuyant sur les observations faites à Fribourg, à Genéve et à l'hospice du mont Saint-Bernard, admet que la loi que nous venons d'indiquer se vérifierait de même pour toute autre température de la surface du

[1] *Petite physique du globe*, t. I, p. 79.

sol; et, de plus, que la première différence et l'excès d'une différence sur la suivante seraient proportionnels à la différence des températures du sol et de la couche limite de l'atmosphère; de manière qu'il serait facile de calculer, en partant des valeurs 9°, 0°,4 et 30°, les deux nombres dont dépendent toutes les différences, pour des températures quelconques de la surface du sol, et, par suite, de dresser des tableaux analogues à celui qui précède.

Les hauteurs qui correspondent aux températures du tableau précédent, se calculent au moyen de la formule du baromètre (1,398). La courbe de la *fig.* 825 montre comment varient, pour des diminutions de température égales, ces hauteurs, qui sont représentées par les ordonnées, à l'échelle de 1^{mm} pour 1000^{m}. On voit que, si l'on suppose la température du sol à 30°, les hauteurs qui correspondent à une même diminution de température vont d'abord en croissant assez régulièrement jusqu'à la hauteur de 3 à 4000^{m}, pour laquelle la température est de 5 à 10°; au-delà, les hauteurs correspondantes à 1° de moins, croissent un peu moins vite, puis de plus en plus rapidement. Cela revient à dire que, d'abord, le refroidissement, à mesure qu'on s'élève, va en s'accélérant; cette accélération est plus prononcée vers 3000^{m} de hauteur, et plus haut, elle est de moins en moins prononcée à mesure qu'on s'approche des limites de l'atmosphère.

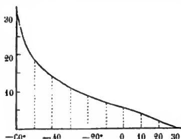


Fig. 825.

La hauteur à laquelle la température décroît le plus rapidement dépend de la température du sol. On pourra toujours la calculer en suivant la marche que nous venons d'indiquer pour le cas où cette température est de 30°.

De Humboldt a reconnu, sur le Chimborazo, que le décroissement est peu prononcé entre 1000^{m} et 3000^{m}, où se trouve, sous l'équateur, la région des nuages, qui, en retenant la chaleur solaire, adoucissent la température. M. J. Welsh, dans 4 ascensions aérostatiques faites à Londres dans des circonstances atmosphériques très diverses, a reconnu l'existence d'une couche d'air de 600^{m} environ d'épaisseur, dans laquelle la température est sensiblement constante, et qui paraît liée d'une manière immédiate avec la précipitation des vapeurs atmosphériques. A la cause de ce ralentissement dans la diminution de température, invoquée par de Humboldt, il faut sans doute ajouter le dégagement de la chaleur latente qui accompagne la précipitation de la vapeur.

1120. Circonstances qui modifient le décroissement de la température. — Tout ce que nous venons de dire suppose qu'en prenant la moyenne d'un grand nombre de résultats, on a fait disparaître l'effet des circonstances qui modifient le décroissement; telles que l'heure, la saison et la latitude du lieu.

Influence horaire. — Pour reconnaître cette influence, il faut faire des observations horaires simultanées à de grandes différences de niveau. C'est ce qu'ont fait de Saussure pendant 17 jours, au Col du géant, à 3428^m au-dessus de la mer, pendant que l'on observait en même temps le thermomètre à Chamounix et à Genève; et M. Kaemtz sur le Rigi, à 1810^m de hauteur, pendant qu'on observait simultanément à Bâle, à Berne, à Genève et à Zurich[1]. Les courbes de la *fig.* 826 montrent comment varie la hauteur correspondant à un abaissement de 1°, aux différentes heures du jour. Ces hauteurs sont représentées par les ordonnées, à l'échelle de 1^{mm} pour 4^m, en prenant pour point de départ la hauteur de 120^m; les heures sont comptées sur la ligne des abcisses. La courbe *r* correspond aux observations du Rigi, et la courbe *c* à celles du Col du géant. On voit que c'est vers 5 heures du soir que le décroissement de la température est le plus rapide, puisque la hauteur qui correspond

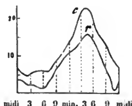


Fig. 826.

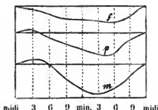


Fig. 827.

à un abaissement de 1° est la plus petite. Le décroissement est le plus petit vers le lever du soleil. Les irrégularités des courbes proviennent de ce que les valeurs qui ont servi à les construire sont trop peu nombreuses.

Il résulte des changements aux différentes heures, du décroissement de la température quand on s'élève, que les courbes des variations diurnes du thermomètre (1105) ne peuvent être parallèles quand elles représentent les observations faites à différentes hauteurs. C'est, en effet, ce qui a lieu. Des observations faites par M. Bravais pendant 44 jours sur le Faulhorn (2673^m), et à Milan, Genève et Zurich, ont mis ce résultat en évidence. La *fig.* 827 représente les courbes des températures horaires pour Milan *m*, Paris *p*, et le sommet du Faulhorn *f* pendant l'été ; pendant l'hiver, elles seraient un peu différentes, comme il résulte des observations de M. Eschmann sur le Rigi.

Influence des saisons. — M. Kaemtz a formé le tableau des différences de niveau correspondant à un abaissement de 1° dans les divers mois de l'année, pour Genève et le Saint-Bernard, et pour l'Allemagne méridionale et le nord de l'Italie. Les deux courbes de la *fig.* 828 montrent ces différences de niveau pour les divers mois. La courbe *m* correspond à Genève et au

[1] *Cours complet de météorologie*, par M. F. Kaemtz, p. 109.

Saint-Bernard, et la courbe *n* à l'Allemagne et l'Italie. On voit que c'est pendant les mois les plus chauds que le décroissement de la température est le plus rapide, ce qui se conçoit facilement. On voit aussi que l'influence des saisons diminue à mesure que le point de départ est plus élevé. D'où l'on doit conclure que la différence entre les moyennes estivales et hibernales doit diminuer à mesure qu'on s'élève. En effet, cette différence est de 19° dans les plaines de la Suisse, à 400 mètres environ au-dessus du niveau de la mer; de 15° sur le Saint-Gothard (2091^m); de 13°,5 sur le Saint-Bernard (2493^m).

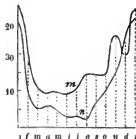


Fig. 828.

Influence de la latitude. — De même que le décroissement de la température à mesure qu'on s'élève est plus rapide en été qu'en hiver, de même il est plus rapide dans les pays chauds que dans les pays froids. En s'arrêtant au point où le décroissement est le plus rapide, M. Saigey trouve que, si le sol est à 30°, le décroissement est, en moyenne, de 1° pour 175^m de hauteur. Si la température du sol baisse de 10° en 10°, cette hauteur devient successivement 190, 209, 235, 270, 323, 411, 588, 1038 et 6144 mètres.

L'influence des saisons dépend aussi de la latitude; tandis qu'elle est nulle à l'équateur, cette influence va en augmentant à mesure qu'on s'avance vers le pôle nord. Mais on ne possède que peu d'observations à ce sujet.

Tout ce qui précède ne s'applique qu'aux parties de l'atmosphère qui recouvrent les continents. Au-dessus de la mer, dont la température change peu pendant le jour et même pendant toute l'année, les résultats seraient sans doute différents. Pour s'en assurer, on n'a pas d'autre ressource que les ascensions aérostatiques; mais le danger de s'élever au-dessus de la mer explique l'absence d'observations faites dans ces conditions.

Interversions. — Pendant les hivers rigoureux on observe souvent une *interversion* dans les variations de la température; au lieu d'aller en diminuant à mesure qu'on s'élève, la température augmente jusqu'à une hauteur d'une centaine de mètres, après laquelle elle commence à diminuer. M. Fournet a recueilli dans le sud-est de la France et en Suisse un grand nombre d'exemples de ce phénomène, qu'il attribue à la superposition du vent du sud sur le vent du nord. Six, Pictet, Marcet, ont constaté que pendant la nuit, une heure environ après et avant le coucher du soleil, la température croît avec la hauteur. M. Ch. Martins, à Montpellier, a fait de nombreuses expériences au moyen de 6 thermomètres à index, placés à des hauteurs au-dessus du sol, variant de 0^m,05 à 49^m,4. Sur 97 nuits d'observations, échelonnées dans 15 mois consécutifs, 88 ont donné un accroissement avec la hauteur; l'excès moyen du thermomètre supérieur sur le thermomètre inférieur était de 4°,36, le ciel était pur et l'air calme. Les 9 autres nuits, pendant lesquelles le ciel était couvert, ont donné un faible décroissement, la différence moyenne entre les

deux thermomètres était de 0°,07, L'accroissement nocturne avec la hauteur est donc le cas général; il s'explique par le froid communiqué aux couches inférieures de l'air par le sol refroidi par le rayonnement vers les espaces célestes. C'est surtout dans les vallées que ces effets sont sensibles, l'air refroidi tendant à *couler* dans les dépressions du sol, et c'est pourquoi les végétaux souffrent davantage du froid dans les vallées que sur les éminences peu élevées. M. Ch. Martins conclut de là qu'il faut apporter le plus grand soin au choix de la position des observatoires météorologiques, une différence de quelques dizaines de mètres dans la hauteur suffisant pour modifier notablement les températures observées. C'est ainsi que, à Montpellier, le minimum moyen annuel est de 2°91 plus basse au jardin des plantes qu'à la faculté des sciences, les niveaux différant de 30 mètres[1].

L'interversion a été souvent observée dans les régions boréales. Des expériences faites en 1840 à Bosekop, au moyen de cerfs-volants et de ballons captifs portant des thermomètres à différentes hauteurs, ont donné une augmentation de 1°,6 pour les 100 premiers mètres, après lesquels la température décroît, d'abord lentement, puis plus rapidement. Dans ces climats cette loi peut exister même en plein jour. La différence a été quelque fois jusqu'à 6°. On a expliqué ces faits en partie par la présence fréquente du contre-courant supérieur venant de la mer. Le refroidissement du sol, qui rayonne pendant plusieurs semaines en l'absence du soleil, dans ces latitudes élevées, doit aussi contribuer à ce résultat.

1121. Limite des neiges perpétuelles. — Les neiges qui recouvrent les cimes des hautes montagnes ont une limite inférieure qui varie avec les saisons. L'*amplitude* de ces variations qui n'est que de 25 à 30^m sous l'équateur va en augmentant à mesure qu'on s'en éloigne. Par exemple, dans les Andes, elle est de 600 à 750^m, à la latitude de 19 à 20°. On prend pour *limite des neiges perpétuelles*, le niveau auquel elles s'arrêtent pendant l'été. De loin, cette limite paraît horizontale; et il en part de longues traînées blanches, formées par les glaciers que produit l'accumulation des neiges qui glissent dans les vallées transversales.

La limite des neiges éternelles va généralement en s'abaissant quand on s'avance vers les pôles; mais cette loi présente de nombreuses anomalies. Ce n'est pas entre les tropiques que la limite est la plus élevée, et le phénomène est d'autant plus irrégulier qu'on s'avance davantage vers les pôles. La limite dépend d'une foule de circonstances: de la température moyenne et des extrêmes, elle suit principalement les inflexions des lignes *isothères*; de la direction des vents régnants et des régions qu'ils ont traversées; de l'épaisseur de la neige déposée pendant l'hiver; de la forme des massifs et de la proximité d'autres pics neigeux; du voisinage de plateaux étendus.

En Amérique, la limite des neiges est, sous l'équateur, à 4800^m; elle

[1] *Comptes-rendus des séances de l'Académie des sciences* de Paris, t. LI, p. 1083.

s'abaisse quand on marche vers le tropique septentrional, tandis qu'elle s'élève en marchant vers le sud. Ainsi, M. Pentland l'a trouvée, au Chili, sous 15 à 18° de latitude, à 800 mètres plus haut qu'à l'équateur sur le Chimborazo, le Cotopaxi et l'Antisana. La neige disparaît quelquefois sur le volcan d'Aconcagua (lat., 32°,5), qui dépasse de 450^m la cime du Chimborazo. Sous l'équateur, on n'a observé les neiges perpétuelles qu'en Amérique ; les îles qu'il coupe ne présentent pas de hautes montagnes, et en Afrique, où il y a, dit-on, des chaînes aussi élevées que les Andes, il ne paraît pas qu'il y ait de neiges perpétuelles, ou du moins la hauteur des plateaux et l'accumulation des sables doivent en rendre la limite prodigieusement élevée [1].

Dans l'Asie, sur le versant méridional de l'Himalaya, la limite des neiges est, d'après M. Webb, à 3956^m de hauteur, tandis qu'elle s'élève sur le versant septentrional, jusqu'à 5067^m ; presque autant que sous l'équateur. Cette anomalie s'explique par l'influence du plateau thibétain, dont la hauteur moyenne au-dessus de la mer paraît être de 3500^m.

Voici le tableau des limites des neiges perpétuelles dans différents pays, en suivant l'ordre des latitudes :

	LATITUDE.	LIMITE des neiges.	TEMPÉRATURE MOYENNE	
			annuelle.	estivale.
Ile Mageroe	71°,15′	720^m	0°,2	6°,4
Norwége	66 à 67	1266	»	»
Islande	65	936	4,5	12
Laponie	60	1169	»	»
Oural	59,40	1460	1,2	16.7
Kamtschatka	»	1600	2,0	12,6
Altaï	»	2144	2,8	17,8
Alpes	»	2700	11,2	18,4
Caucase	»	3372	13,8	21,6
Pyrénées	42 à 43	2728	15,7	24,0
Etna	37,36	2905	18,8	25,1
Himalaya (Nord)	30 à 31	5067	»	»
Id. versant (Sud)	»	3956	»	»
Mexique	19	4500	25	27,8
Abyssinie	13,10	4287	»	»
Andes de Quito	0 à 2	4812	»	»
Chili	33	4483	»	»
Détroit de Magellan	53 à 54	1130	»	»

[1] De Humboldt, *Ann. de ch. et de ph.*, 2e série; t. XIV, et Cosmos, t. I, p. 393.

V. Température de l'espace. — Rayonnement nocturne.

1122. Température des espaces planétaires. — Fourier a admis le premier que l'espace dans lequel se meuvent les planètes possède une température propre, due aux rayons de chaleur émis par tous les corps célestes, en exceptant le soleil et les planètes de notre système. Cette température est nécessairement plus basse que la plus faible qu'on a pu observer dans les régions polaires. Or, on a vu le thermomètre descendre à —57°, ce nombre donne donc un premier aperçu de la température de l'espace. M. Saigey a cherché à l'évaluer par trois méthodes différentes [1] :

1° En considérant la loi du décroissement de la température correspondant à une diminution constante de la pression (1119), il a trouvé —60° pour une pression nulle, c'est-à-dire aux limites de l'atmosphère.

2° Les variations diurnes en un même lieu, sont d'autant plus faibles que la moyenne est plus basse (1106). En supposant que cette loi se vérifie au-delà des limites des observations, la moyenne pour laquelle les variations deviendraient nulles serait la température de l'espace; car la chaleur reçue en un lieu se compose d'une quantité variable, due à l'action du soleil, l'autre constante venant de l'espace. S'il n'y a plus de variations diurnes, c'est que la première cessant d'exercer son influence, l'autre reste seule, et représente la température de l'espace. Des observations faites à Genève, à Fribourg, sur le Saint-Bernard et dans le nord de l'Amérique, M. Saigey déduit les résultats moyens qui suivent :

Moyenne du jour...............	20°	10°	0°	—10°	—20°	—30°
Variations extrêmes du jour à la nuit.	10°,5	9°	7°,8	6°,5	5°,2	3°,6

Chacune des variations peut s'obtenir en retranchant 1,3 de celle qui la précède. Si l'on continue cette loi, on trouve qu'on arrive à une variation nulle en considérant trois termes de plus, qui correspondent aux moyennes —40°, —50° et —60°, dont la dernière représenterait la température de l'espace.

3° Les moyennes températures s'abaissant à mesure qu'on s'élève, et les extrêmes s'écartant à mesure que la moyenne est plus forte, les différences des températures observées à différentes hauteurs doivent être d'autant plus prononcées que la température au point le plus bas est plus élevée; c'est, en effet, ce qui a lieu. En cherchant à quelle température la différence devient nulle, on aura encore la température de l'espace, puisqu'elle doit être la même pour toutes les hauteurs. Or, les observations faites à Genève, à Fribourg et à l'hospice du Saint-Bernard, donnent les résultats suivants :

[1] *Petite physique du globe*, t. I, p. 73.

Température à Genève............	30°	20°	10°	0°	— 10°	— 20°
Excès sur la température à Fribourg..	2,3	2	1,8	1,6	1,3	1
Id. au Saint-Bernard.	15	13	11	9	7	5

La série des différences au St-Bernard forme une progression arithmétique dont la raison est 2 ; et le terme égal à 0° correspondrait à une température comprise entre —40° et —50°. La série des différences à Fribourg ne suit pas une loi aussi simple; mais on peut en obtenir les différents termes en retranchant de celui qui précède tantôt 0,2, tantôt 0,3. En adoptant 0,3, on trouve que la température qui correspond à une différence nulle est comprise entre —50° et —60° ; et en adoptant 0,2, on trouve —70°. On peut donc admettre —60°.

1123. Méthode par le rayonnement vers l'espace. — M. Pouillet a trouvé de nouvelles valeurs de la température de l'espace, au moyen d'un appareil particulier, auquel il a donné le nom d'*actinomètre*, par lequel Herschell a désigné tous les instruments destinés à mesurer les effets du rayonnement. Supposons un thermomètre exposé pendant la nuit au rayonnement vers l'espace, la chaleur qu'il reçoit provient de deux sources, l'une constante qui lui vient de l'espace, l'autre variable qui provient des rayons émis par les molécules de l'air atmosphérique. Or, on peut concevoir une enceinte d'une température telle que son rayonnement remplace celui de l'espace et de l'atmosphère. M. Pouillet appelle la température inconnue de cette enceinte, *température zénithale*. Elle varie à chaque instant, et d'un point à un autre de la surface de la terre; puisqu'elle dépend de la température de l'air, qui est elle-même variable. Voyons d'abord comment on observe la température zénithale au moyen de l'*actinomètre*.

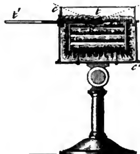


Fig. 829. — 1/3.

Actinomètre de M. Pouillet. — Cet appareil (*fig.* 829) est composé de plusieurs peaux de cygne, garnies de leur duvet, et étendues sur des anneaux superposés horizontalement, de manière que le duvet ne soit pas comprimé. Un thermomètre *tt'* repose sur la partie supérieure. Le tout est enveloppé d'un cylindre en plaqué d'argent, recouvert lui-même d'une peau de cygne, et renfermé dans un second cylindre *cc'*. Le rebord *c* de ce dernier dépasse le thermomètre, qui ne voit que les deux tiers de la voûte céleste. Des trous pratiqués au niveau du duvet permettent à l'air froid de s'écouler.

L'actinomètre étant exposé pendant la nuit au rayonnement vers un ciel pur, on observe d'heure en heure la différence entre sa température et celle,

[1] *Comptes-rendus des séances de l'Académie des sciences* de Paris, t. VII, p. 53.

plus élevée, d'un thermomètre ordinaire placé à un demi-mètre au-dessus du sol, et donnant la température de l'air ambiant. Il faut déduire de cette différence la température zénithale.

Remarquons d'abord que, si l'actinomètre était placé dans le vide sous une enceinte hémisphérique, de manière que son thermomètre pût voir l'hémisphère tout entier, il en indiquerait la température (778) ; mais s'il n'en voit que les deux tiers, et s'il est entouré d'air qui l'échauffe, il donnera une température plus élevée que celle de l'enceinte. Pour trouver le rapport entre cette température de l'enceinte et l'abaissement de l'actinomètre au-dessous de la température de l'air, M. Pouillet a formé un ciel artificiel au moyen d'un vase de zinc d'un mètre de diamètre, au-dessous duquel il a placé l'actinomètre. Le vase de zinc était rempli d'un mélange réfrigérant qui lui communiquait une température de —20°, et l'actinomètre était placé successivement à des distances telles que son thermomètre pût voir $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{3}$, $\frac{2}{3}$ d'hémisphère. Dans chaque position, on notait la différence a entre la température de l'appareil et celle de l'air ambiant, qu'on prenait successivement à différentes températures. Ces expériences ont conduit au résultat suivant : si de la température t de l'air ambiant on retranche les $\frac{9}{4}$ de la différence a, on trouve sensiblement la température z du ciel artificiel ; de sorte qu'on a $z = t - \frac{9}{4}a$.

Au moyen de cette loi, appliquée à la voûte céleste, M. Pouillet a calculé les températures zénithales à différentes époques de l'année et à différentes heures du jour, et il a reconnu que ces températures s'élèvent et s'abaissent à peu près comme celles de l'air ambiant. Ce résultat est d'accord avec ceux qu'avaient constatés plusieurs expérimentateurs : ainsi, M. Wells et M. Daniell ont vu, dans nos climats, la température de la surface du sol descendre à 7° ou 8° au-dessous de celle de l'air ambiant ; Wilson a trouvé la neige à 9° au-dessous de l'air, et Scoresby et Parry ont observé une différence semblable pendant que l'air se trouvait à — 20°. La différence entre la température de l'air et celle de l'actinomètre étant à peu près constante, on voit que la chaleur de l'espace ne produit qu'un effet insensible, comparativement à celui que produit le rayonnement de l'atmosphère ; la température de l'espace est donc très basse.

Il s'agit maintenant de trouver une relation entre la température zénithale z et la température de l'espace. D'abord, la quantité de chaleur émise dans l'unité de temps par l'unité de surface de l'enceinte zénithale, est donnée par la formule $v = ma^z$ (788). D'un autre côté, l'atmosphère émet une quantité de chaleur égale à mea^t, en appelant e son pouvoir émissif, et t la température moyenne de la colonne d'air verticale ; et l'espace émet une quantité de chaleur égale à ma^x, en représentant par x sa température. Une partie de cette dernière quantité de chaleur est absorbée par l'air, de sorte qu'il n'arrive au sol que la quantité $(1 - e')ma^x$, en appelant e' le pouvoir absorbant de l'atmosphère pour les rayons de l'espace. La quantité de chaleur envoyée par l'espace et l'air devant être égale, par définition, à celle qu'envoie l'enceinte zénithale, on aura

$$ma^x = mea^t + (1 - e')\, ma^x, \qquad \text{ou} \qquad a^x = ea^t + (1 - e')\, a^x.$$

En considérant cette équation comme une équation de condition à laquelle doivent satisfaire les valeurs de la température zénithale données par l'expérience, M. Pouillet a pu déterminer des limites pour la température de l'espace. Mais l'évaluation de la température moyenne t de la colonne atmosphérique laisse beaucoup d'incertitudes.

M. Pouillet a alors cherché à se passer de cette donnée, et il y est parvenu en s'appuyant sur la constance des phénomènes qui se manifestent annuellement dans les régions équatoriales. Il est arrivé, au moyen de diverses considérations ingénieusement déduites, et pour lesquelles nous renverrons à son Mémoire, à l'équation

$$a^x = 1{,}235\, \frac{2 - e}{2 - e'} - 0{,}489,$$

dans laquelle les lettres représentent les mêmes quantités que dans les formules précédentes. L'ensemble des expériences faites sur les rayons solaires donnant $e' = 0{,}35$ (1096), cette équation revient à

$$a^x = 1{,}008 - 0{,}748\, e,$$

formule qui ne contient plus que l'inconnue x et le pouvoir émissif ou absorbant e de l'atmosphère relativement aux rayons terrestres. On voit que la plus petite valeur de a correspond à la plus grande de e. Or, e ne peut pas être plus grand que 1. En lui donnant cette valeur, on trouve $x = -175°$. D'où l'on conclut que la température de l'espace n'est pas inférieure à ce nombre. Les expériences de température zénithale montrent que e ne peut être moindre que 0,8; ce qui donne $x = -115°$. Des observations multipliées, faites à des latitudes et à des hauteurs très différentes, pourront seules faire connaître la valeur comprise entre ces deux limites. M. Pouillet a conclu, des expériences qu'il a faites, le nombre $-142°$, comme exprimant approximativement la température de l'espace. On voit que ce nombre est bien inférieur à ceux que l'on avait obtenus jusque-là, et qu'il est peu au-dessus de la température qui correspond au *zéro absolu*, d'après M. Person (933),

Des expériences de M. Ch. Martins et A. Bravais montrent bien l'influence de la couche atmosphérique sur la température zénithale : sur le Faulhorn, l'*actinomètre* était à 6°,27 au-dessous de la température de l'air ; et à Brientz à 2110 mètres plus bas, la différence n'était que de 4°,62. Sur le grand plateau du mont Blanc, et à Chamounix à 2800ᵐ plus bas, les différences étaient 10°,82 et 5°,62. Le rayonnement est donc beaucoup plus fort sur la montagne que dans la plaine, et le rapport des rayonnements croît plus rapidement que la hauteur; car, pour les deux premières stations, dont les hauteurs au-dessus de la mer sont 570ᵐ et 2680ᵐ, le rapport est 1,36 ; tandis qu'il est 1,98 pour les deux autres stations, dont les altitudes sont 1050ᵐ et 3930ᵐ.

1124. Rôle de l'atmosphère dans la distribution de la chaleur à la surface du globe. Quel que soit le nombre qu'on adopte pour exprimer la température de l'espace, il est certain que cette température est très basse. Le sol que nous habitons se trouve donc dans une singulière situation : d'un côté règne la chaleur excessive du feu central, et de l'autre le froid de l'espace. La croûte solide intercepte par son épaisseur la chaleur qui vient de l'intérieur, tandis que l'atmosphère empêche la chaleur de la terre de se dissiper dans l'espace. On pourrait donc appeler l'atmosphère le *vêtement* de la terre ; sans elle, nous passerions de la chaleur excessive produite pendant le jour par les rayons solaires dont aucune portion ne serait interceptée, au froid intense qui résulterait, pendant la nuit, du rayonnement entièrement libre vers l'espace. Remarquons aussi, avec M. Saigey, que la présence de l'atmosphère tend à rendre plus uniforme la distribution de la chaleur solaire : pendant le jour, l'air en absorbe une partie qui sert à l'échauffer, ou qui devient latente en augmentant son volume ; pendant la nuit, l'air intercepte une partie des rayons obscurs émis par le sol, et, en se refroidissant, se contracte et ramène à l'état sensible la chaleur latente qu'il avait absorbée pour se dilater. L'atmosphère se comporte donc comme un régulateur de la chaleur, qui la fait disparaître en partie quand elle arrive trop abondamment, et la restitue quand il y a refroidissement en l'absence du soleil.

1125. Effets du rayonnement nocturne. — Quand l'atmosphère est pure, les corps placés à la surface de la terre rayonnent vers les espaces planétaires, qui ne leur envoient en échange que des rayons très faibles, de manière qu'ils se refroidissent au-dessous de la température ambiante, malgré l'influence modératrice de l'atmosphère. Wilson est le premier qui ait observé les effets du rayonnement nocturne ; il trouva, vers la fin de 1783, qu'un thermomètre couché sur la neige marquait — 21°,7, pendant qu'un instrument semblable suspendu à 4 pieds de hauteur, marquait — 13°,9. Des nuages étant survenus, le thermomètre inférieur remonta à — 13°,9. Le même observateur remarqua aussi que la différence entre la température du sol et celle de l'air à un ou deux mètres de hauteur, restait la même, quelle que fût la température de cet air ; résultat qui a été confirmé depuis par les observations de M. Pouillet et de divers autres physiciens, entre autres par celles de Parry et Scoresby dans les régions boréales. Après Wilson, Pictet et Six constatèrent que l'herbe présentait, pendant une nuit calme et sereine, 7° à 8° de moins que l'air à 2m de hauteur. Wells a surtout multiplié ces sortes d'expériences, dans ses recherches sur la rosée. Melloni, pour arriver à des résultats plus précis, a cherché à éviter les effets du rayonnement du thermomètre supérieur, en garnissant le réservoir d'une enveloppe mince en argent poli, fermée par un bouchon que traversait la tige du thermomètre. L'instrument ainsi armé était placé dans un vase de fer-blanc en forme de tronc de cône renversé, soutenu par de minces tubes en fer-blanc. Le thermomètre placé sur le sol était disposé de la même manière, seulement l'enveloppe en argent était noircie. Melloni a

vérifié, au moyen de ces instruments, ce fait, constaté déjà par Pictet et Six, que la température de la couche d'air la plus basse, est beaucoup plus faible que celle des couches qui sont au-dessus, à cause de son contact avec le sol. C'est à un effet semblable qu'il faut attribuer le froid pénible qu'éprouvent pendant la nuit les voyageurs qui traversent les déserts de sables, où l'air, d'un calme parfait, prend dans ses couches inférieures la température du sol, notablement refroidi par son rayonnement à travers une atmosphère d'une pureté remarquable.

Depuis un temps immémorial, on se sert, au Bengale, pour fabriquer de la glace, du froid produit par le rayonnement. Des vases plats remplis d'eau sont disposés dans une excavation remplie de paille de maïs. Un rebord en terre régne tout autour et retient l'air refroidi. Quand le ciel est serein, l'air calme et au-dessous de 10°, l'eau se congèle, même quand un thermomètre couché sur la paille marque 5°. D'aprés M. Williams, il y a de ces manufactures de glace qui occupent plusieurs centaines d'ouvriers. Wells est parvenu, en Angleterre, à faire de la glace, pendant l'été, par le même moyen. A Saint-Ouen, prés Paris, on a fabriqué de la glace par le même procédé; mais la rareté des nuits sereines, et le bas prix de la glace des glacières, ont fait renoncer à l'entreprise.

1426. Causes qui diminuent les effets du rayonnement nocturne. — Parmi ces causes, nous citerons d'abord le vent, qui renouvelle sans cesse autour des corps, l'air qui leur cède de la chaleur. C'est à une cause semblable qu'il faut rapporter une pratique employée pour empêcher les vignes de geler : on les détache des échalas qui les soutiennent, afin que les ceps, agités par le moindre vent, se mettent en contact dans leurs ballottements avec une grande masse d'air.

Les brouillards, les nuages, garantissent du froid, en substituant les rayons qu'ils émettent à ceux beaucoup plus faibles de l'espace. C'est quand le ciel est serein, que le froid est surtout vif pendant l'hiver. En 1762, la Seine fut prise aprés six jours d'un ciel pur, pendant lesquels la température moyenne fut de — 3°,9, et le minimum de — 9°,7; tandis qu'en 1748, la Seine ne gela pas, quoique la température moyenne fût pendant huit jours, de — 4°,5; c'est que le ciel fut constamment nuageux. D'aprés Garcilasso di Vega, les Péruviens, quand ils voyaient le temps trés clair, brûlaient du fumier pour dégager une épaisse fumée, et former un nuage artificiel qui préservait d'un froid trop vif les pousses des jeunes plantes.

Les arbres, les édifices, les rochers, en un mot tous les obstacles qui cachent une partie du ciel, empêchent ou atténuent les effets du rayonnement nocturne. En 1794, les vignes de la Bourgogne furent gelées, excepté celles qui étaient plantées d'arbres. Pendant les nuits sereines, il fait moins froid sous les arbres, au pied des murs, qu'en rase campagne. Les troupeaux, qui passent la nuit dehors dans certaines contrées, recherchent instinctivement le voisinage des arbres ou des rochers.

Lune rousse. — Les habitants des campagnes désignent sous le nom de *lune rousse* celle qui devient pleine à la fin d'avril ou dans le courant de mai. Ils attribuent à ses rayons la propriété de faire roussir, c'est-à-dire geler, les bourgeons alors jeunes et gorgés de séve. Arago a prouvé que cet effet est dû au froid produit par le rayonnement vers l'espace, la présence de la lune ne faisant qu'attester que le ciel est pur. Pour préserver les plantes, les jardiniers disposent des nattes ou autres abris, dont l'efficacité vient, non de ce qu'ils interceptent les rayons de la lune, mais de ce qu'ils cachent une partie du ciel. Comme c'est vers le zénith que la chaleur se perd le plus facilement (1095), il est bon de disposer les écrans horizontalement, au-dessus des plantes à préserver.

Ethrioscope. — Le rayonnement nocturne ayant une grande influence sur les plantes, on a cherché à en mesurer l'intensité. On emploie pour cela l'*éthrioscope*. Cet instrument consiste en une demi-sphère en métal poli, au centre de laquelle est placée la boule d'un thermomètre qui peut voir tous les points du ciel, et se trouve préservé du rayonnement du sol. Leslie employait, dans un autre but, un miroir parabolique au foyer duquel se trouvait l'une des boules d'un thermomètre différentiel, et dont l'ouverture était tournée vers le ciel. Un semblable appareil, muni d'un thermomètre à minimum et installé sur une haute montagne, où la présence de l'air n'a que peu d'influence sur la température zénithale, pourrait conduire à une évaluation de la température de l'espace, plus certaine que celles que l'on a obtenues par les moyens que nous avons décrits.

VI. Température de la terre et des eaux à différentes profondeurs.

1127. Moyens d'observation. — Pour mesurer la température du sol à une petite profondeur, on enfonce dans la terre des thermomètres, à tige assez longue pour que le niveau du mercure dépasse la surface du sol, et l'on tient compte de la différence entre les températures des divers points de la tige et celle du réservoir. M. Boussingault a procédé en pratiquant un trou de sonde, au fond duquel il introduisait un thermomètre attaché à un cordon servant à le retirer. L'ouverture du trou de sonde était abritée et fermée, pour éviter la circulation de l'air ; il opérait sous un hangar ou dans une cabane de sauvage.

M. Becquerel a mesuré la température du lac de Genève à différentes profondeurs, au moyen d'un appareil qui peut servir aussi à observer celle des couches superficielles du globe. Cet appareil, analogue à celui que nous avons décrit (1021), se compose d'un fil de cuivre et d'un fil de fer (*fig.* 830) soudés l'un à l'autre par un de leurs bouts, et communiquant par l'autre avec les extrémités du fil de cuivre d'un *rhéomètre multiplicateur*. La soudure *s* est plongée dans le milieu dont on veut obtenir la température ; un lest sert à l'y

maintenir. Les fils sont recouverts de coton goudronné qui les sépare de la terre humide ou de l'eau, et peuvent s'enrouler sur un petit treuil *t*. Les déviations de l'aiguille du rhéomètre font connaître la différence entre la température de la soudure plongée *s*, et celle de l'air dans lequel se trouve l'autre extrémité du fil de fer. Pour obtenir des résultats faciles à apprécier, le fil de fer ne doit avoir que 160ᵐ à 200ᵐ de longueur, quand son diamètre est de 1 millimètre. Un semblable appareil, installé d'une manière fixe, apporte à chaque instant au dehors l'indication de la température de la couche profonde dans laquelle est enfoncée l'une des soudures.

1128. Température du sol a différentes profondeurs. — Les rayons solaires produisent dans les couches supérieures du globe des variations diurnes et annuelles de température, qui dépendent de la conductibilité du sol, de l'état de sa surface, de sa perméabilité qui permet aux eaux pluviales de transporter à une profondeur plus ou moins grande la chaleur de la surface; elles dépendent surtout de l'amplitude des changements à la surface : plus cette amplitude est grande, plus les variations se font sentir profondément. Remarquons, du reste, que la température de la surface est généralement très différente de celle de l'air ; pendant le jour, elle est plus élevée, à cause de l'absorption des rayons solaires qui ont traversé l'atmosphère, et pendant la nuit, elle est plus basse, à cause du rayonnement vers l'espace. Les différences sont surtout sensibles sur les montagnes, où la présence de l'air ne les atténue pas autant. Ils dépendent aussi de l'obliquité des rayons solaires (775). En été, la température superficielle peut atteindre, dans nos climats, 50° à 60°.



Fig. 830.

Fourier a étudié par le calcul la marche de la chaleur solaire à travers les couches superficielles du globe, dans plusieurs Mémoires dont le premier date de 1807. Il a établi que la chaleur qui se distribue dans la terre est assujettie à trois mouvements : 1° le passage presque insensible de la chaleur centrale à travers la croûte solide ; 2° un mouvement extrêmement lent, devenu sensiblement uniforme, qui entraîne la chaleur accumulée par le soleil dans les régions équatoriales, vers les régions polaires, où cette chaleur se dissipe dans l'espace, après avoir adouci le climat des zones glaciales ; 3° un mouvement périodique qui se fait sentir jusqu'à une certaine profondeur. La quantité de chaleur solaire qui détermine ce mouvement, oscille dans les couches extérieures de la terre; elle s'enfonce pendant une partie de l'année, et pendant la saison opposée, elle remonte et rayonne vers l'espace. Voici les lois de ce mouvement périodique :

I. Il y a une profondeur à laquelle les variations diurnes disparaissent ; il en est de même pour les variations annuelles. La profondeur où cette disparition

a lieu est proportionnelle, en un même lieu, à la racine carrée de la période considérée. Ainsi, les variations diurnes cessent à une profondeur 19 fois plus petite environ que les variations annuelles; le carré de 19 étant 361, qui diffère peu du nombre de jours de l'année. En France, la limite des variations diurnes se trouve à 1^m environ de profondeur, et en Allemagne de $0^m,6$ à $0^m,8$.

La couche dans laquelle les variations annuelles cessent d'être sensibles, se nomme *couche invariable*; elle se trouve à une profondeur d'autant plus petite, que les extrêmes diffèrent moins, c'est-à-dire qu'on s'approche davantage de l'équateur, où elle n'est qu'à quelques mètres, tandis qu'en France elle se trouve à 20 à 30^m, et en Allemagne entre 6^m et 10^m.

II. Les différences entre le maximum et le minimum diminuent dans les couches en formant une progression géométrique quand les profondeurs croissent en progression arithmétique. Ces différences, *d*, peuvent donc être représentées par la formule $d = cn^{-h}$, dans laquelle h représente la profondeur, et c et n des constantes que l'on détermine au moyen de deux observations.

M. Quételet a commencé, en 1834, une série d'observations pour vérifier cette loi; il a enfoncé des thermomètres à longue tige jusqu'à 8^m de profondeur. Les résultats observés n'ont différé de ceux que donne la formule, que de quelques dixièmes de degré, tantôt dans un sens et tantôt dans l'autre. Il faut remarquer cependant que cette formule n'est pas vraie pour $h = 0$; elle ne donne donc pas la température à la surface.

III. La moyenne annuelle observée à différentes profondeurs coïncide sensiblement avec celle que l'on observe dans l'air. D'où il résulte que cette dernière peut être évaluée au moyen de l'observation d'appareils enterrés à l'abri de l'influence du rayonnement. Mais il faut remarquer que le maximum et le minimum ne se manifestent pas aux mêmes époques dans les différentes couches, à cause du temps que met la chaleur à pénétrer dans la terre. M. Quételet a trouvé, à Bruxelles, que la vitesse moyenne de transmission, à partir de la surface du sol, avait fait parvenir la chaleur jusqu'à $7^m,80$ pendant 144 jours, ce qui donne $0^m,3$ en 6 jours. Les variations diurnes mettent à peu près 3 heures à parvenir à une profondeur de $0^m,1$. Voici quelques-uns des résultats produits par cette lenteur de transmission [1] :

1° Pendant les mois de *décembre, janvier* et *février*, la température va en croissant à peu près uniformément avec la profondeur jusqu'à la couche invariable. 2° En *mars* et *avril*, la température décroît très vite jusqu'à $0^m,45$ environ, puis moins vite, pour augmenter ensuite. 3° Pendant les trois mois qui suivent, la température suit les mêmes lois, seulement la température décroît moins rapidement et jusqu'à une plus grande profondeur. 4° Au mois d'*août*, la température diminue à peu près uniformément jusqu'à la couche

[1] Garnier, *Traité de météorologie*, p. 41.

invariable. 5° En *septembre*, elle est sensiblement uniforme jusqu'à une petite distance de la couche invariable, près de laquelle elle décroît un peu. 6° En *octobre* et *novembre*, la température augmente jusqu'à une profondeur de 6^m environ, puis devient sensiblement constante jusqu'à la couche invariable. 7° Dans la couche où la température ne varie que de 1^m par an, le maximum se manifeste pendant que le minimum a lieu dans l'air, et réciproquement; les saisons sont donc renversées. Cela a lieu à une profondeur de 8^m environ dans nos climats, et à $8^m,50$ à Bosekop, d'après les observations de M. Bravais.

1129. De la couche invariable. — D'après ce que nous venons de voir, il y a, à une certaine profondeur, une couche où les variations annuelles de la température cessent d'être sensibles. C'est à partir de cette couche de *température invariable* que l'influence de la chaleur centrale commence à se manifester. Depuis un temps immémorial, on avait remarqué que les cavernes, les caves profondes paraissaient froides en été et chaudes en hiver, résultat qui s'explique par la constance de leur température, qui contraste avec celle de l'air. Mais avant l'invention du thermomètre, on ne pouvait arriver à cette explication. C'est à Cassini, en 1671, qu'est due la première observation à ce sujet : il reconnut que la température des caves de l'Observatoire de Paris, dont la profondeur est de $27^m,60$, ne change pas pendant toute l'année. En 1730, Lahire constata de nouveau ce phénomène, dont le comte de Cassini, qui en comprit le premier toute la portée, fit en 1771 l'objet d'études suivies. En juillet 1783, de concert avec Lavoisier, il établit à demeure un thermomètre à mercure très sensible, destiné à constater indéfiniment le phénomène. Ce thermomètre peut donner $\frac{1}{100}$ de degré, fraction qui correspond à une longueur de $\frac{1}{2}$ millimètre ; son réservoir est enfoncé dans un vase de verre rempli de sable fin. Les observations de Cassini et celles de Bouvard ont montré que la température des caves de l'Observatoire est de 11°,82. Pendant 50 ans, elle ne s'est écartée de cette moyenne que de $\frac{1}{4}$° au-dessus et au-dessous, et encore est-on autorisé à attribuer ces légères différences à un courant d'air provenant des carrières qui s'étendent sous Paris, et dans lesquelles on faisait des réparations. La température de l'air à Paris est de 10°,67 ; celle des caves est donc un peu plus élevée.

1130. Application à l'évaluation de la moyenne d'un lieu. — Puisque les moyennes annuelles observées à différentes profondeurs sont égales entre elles, la température de la couche invariable doit être égale à la moyenne de l'air. C'est, en effet, ce qui a lieu à peu près. De là une méthode prompte pour trouver la moyenne des lieux où l'on ne peut séjourner. Mais il faut éviter de descendre au-delà de la première couche invariable, autrement la température pourrait être influencée par la chaleur centrale. Par ce moyen, M. Boussingault, en procédant par la méthode que nous avons indiquée (1064), a pu obtenir la température moyenne de 128 localités situées entre 11° de latitude nord et 5° de latitude sud. M. Erman a trouvé, à Iakoutzh, en Sibérie, une température de — 7°,5, à une profondeur de 16 à 17 mètres, et

des observations faites dans l'air, pendant plusieurs années, lui ont donné le même nombre pour moyenne ; à de plus grandes profondeurs, la température est plus élevée ; à 130^{m}, elle est égale à 0°,5^{m}. Au-dessus de cette limite, la terre reste donc constamment gelée[1]. Nous ajouterons enfin que, le plus souvent, la température de la terre est un peu plus élevée que la moyenne de l'air. M. Wahlenberg attribue à cette circonstance la floraison de certaines plantes à racines profondes, dans des régions où la température moyenne est très basse.

Température des sources. — On a cherché aussi, d'après le conseil de Roebuck, à déduire la température moyenne d'un lieu, de celle des sources qui ne varient pas pendant l'année. Mais il faut se mettre en garde contre les erreurs qui pourraient provenir de leur passage par des canaux très profonds, ou de leur participation à la température de la pluie qui les alimente. Le plus souvent, la température des sources dépasse la moyenne de l'air, surtout sous les latitudes élevées, où la différence peut aller à 3 ou 4 degrés, d'après M. Wahlenberg. De Buch et de Humboldt ont trouvé le contraire sous l'équateur; les sources y sont un peu au-dessous de la moyenne de l'air. M. Kupffer, en partant des observations faites sur un grand nombre de sources par de Buch et par lui-même, a confirmé les résultats qui précèdent; et de Buch en a trouvé l'explication, en remarquant que la température des sources est plus élevée que la moyenne de l'air dans les contrées où il pleut plus abondamment pendant l'été que pendant l'hiver, comme en Suède et en Allemagne, tandis que le contraire a lieu dans celles qui reçoivent plus de pluie pendant l'hiver que pendant l'été, comme en Italie et dans la Norwège. Il résulte de ce qui précède qu'on ne doit adopter la température des sources pour moyenne d'un lieu qu'avec une grande circonspection. Les observations thermométriques faites dans les puits, où l'eau séjourne assez longtemps pour partager la température du sol, donnent des résultats qui semblent devoir être plus exacts.

1131. TEMPÉRATURE DE LA MER. — Pour prendre la température de la mer à diverses profondeurs, on se sert des thermomètres à maximum ou à minimum de M. Walferdin, ou bien encore du *thermomètre plongeur* de M. Bunten. Ce dernier instrument consiste en un thermomètre ordinaire renfermé dans un tube de verre, portant une soupape inférieure, par le moyen de laquelle l'eau s'introduit et reste autour du thermomètre quand on le retire de la mer. Péron employait un simple thermomètre enveloppé dans des substances mauvaises conductrices. Pour les grandes profondeurs, il faut tenir compte de la pression, qui rendrait les indications fautives. Tantôt on préserve l'appareil dans un tube hermétiquement fermé, tantôt on fait une correction. On peut encore, comme l'a proposé M. Despretz, laisser le thermomètre ouvert.

Température à la surface de la mer. — Nous avons déjà dit (1115) que la surface de la mer s'échauffe beaucoup moins que celle du sol; soit parce

[1] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. LIII, p. 225; et LXIX, p. 32.

que les rayons solaires pénétrent à une grande profondeur ; soit à cause de l'agitation qui méle les couches superficielles à celles qui sont au-dessous ; soit enfin à cause de la grande capacité calorifique de l'eau. Le refroidissement est aussi trés lent par les mêmes raisons; et, de plus, parce que les parties refroidies descendent pendant que les couches les plus chaudes viennent les remplacer. La température de la mer n'éprouve donc que de trés faibles variations diurnes. D'aprés J. Davy, le minimum et le maximum se montrent au lever du soleil et vers 3 heures aprés midi.

L'air qui recouvre la mer, tendant à en prendre la température, n'éprouve que des variations périodiques peu étendues, ce qui nous a servi à expliquer la constance des climats marins (1115). En pleine mer, les variations diurnes ne dépassent pas 1 à 2° dans la zono torride, et 2 à 3° dans les zones tempérées. Le minimum a lieu vers le lever du soleil, comme sur les continents, mais le maximum paraît se montrer vers midi au lieu de 2 heures.

On conçoit que l'air ne peut prendre exactement la température de la surface de la mer. Entre les tropiques, d'aprés M. Duperrey, la moyenne de l'air est ordinairement un peu supérieure à celle de la surface de l'eau, dont le maximum est cependant un peu plus élevé que celui de l'air. A partir de la latitude de 25°, l'eau est le plus souvent plus chaude que l'air, et ce résultat, d'autant plus constant qu'on s'approche davantage du pôle, ne souffre presque plus d'exception dans les mers glaciales, où l'air est bien plus froid que l'eau.

La température de la surface de la mer s'abaisse, en général, quand on s'éloigne de l'équateur. Entre les tropiques, elle ne dépasse pas 30°, d'aprés de Humboldt, et ne descend guére au-dessous de 20 à 25° ; et elle est sensiblement constante jusqu'au 27° de latitude. Dans les mers polaires, cette température est rarement supérieure à 0°, même pendant l'été. Vers le 50ᵉ degré, la mer gèle un peu sur les côtes, mais ce n'est que vers 80° que l'on trouve des glaces fixes.

Température de la mer à différentes profondeurs. — Entre les tropiques, la température de la mer va en diminuant, d'abord rapidement, puis trés lentement, jusqu'à la profondeur de 1000 brasses de 1ᵐ,62. A cette profondeur, Sabine a trouvé 7°, lorsque la température à la surface était de 28°3. La plus basse température observée est de 2°,2. Si l'on dépasse le 25ᵉ degré de latitude, on trouve que le décroissement est moins prononcé, et on l'a vu se transformer en une augmentation de température, du 65ᵉ au 70ᵉ degré. D'où l'on a cru pouvoir conclure qu'il y avait une zone où la température était sensiblement constante jusqu'à de trés grandes profondeurs.

L'augmentation de température avec la profondeur a été constatée dans la baie de Baffin, par les capitaines Ross et Frankin. Scoresby l'a observée de son côté dans les parages du Spitzberg. Par exemple, la température étant de — 1° à — 2° à la surface, il a trouvé 2° à 3° à la profondeur de 700 brasses. Il semble que la température de 2°,2, signalée ci-dessus, dans les mers équatoriales à une plus grande profondeur, appartient à une couche

où s'éteignent toutes les variations périodiques, et qui s'élève en s'approchant des pôles. Mais il faut observer que l'accroissement de température avec la profondeur dans les hautes latitudes, n'a pas toujours lieu, comme on l'a cru d'abord. M. C. Martins a montré qu'il ne se présente que pendant l'hiver, lorsque l'air est au-dessous de 0°, et que la mer est refroidie à la surface par les glaces flottantes, refroidies elles-mêmes par le rayonnement et le contact de l'air[1]. En effet, des observations avaient été faites, pendant les mois d'avril et de mai, au sortir de l'hiver. En observant pendant l'été, M. Martins a reconnu un abaissement de température à mesure qu'on descend dans la mer. MM. Bravais, Parry et Scoresby, ont aussi constaté ce résultat pendant la même saison.

1132. Causes qui modifient la température des mers. — Si l'échauffement des mers ne dépendait que de l'action du soleil, leur température serait beaucoup plus haute à l'équateur; et dans les mers polaires on ne la trouverait pas notablement plus élevée au fond qu'à la surface. Mais cette température est influencée par d'autres causes qui sont principalement les courants, les hauts-fonds et le voisinage de certaines côtes.

Courants marins. — Les courants de la mer ont été étudiés principalement par Duperrey, Rennel, et l'Américain Maury, qui en a dressé la carte, de manière à tracer des itinéraires qui ont diminué la durée de certains trajets presque de moitié. Nous citerons le courant équatorial E (*fig.* 843, p. 603), attribué à l'action des vents alizés, qui traversent l'Atlantique de l'est à l'ouest. Il semble partir du cap de Bonne-Espérance, d'où il va en s'élargissant jusqu'au cap St-Roch; sa température le fait reconnaître facilement; d'après de Humboldt, elle est de 22°,5, tandis qu'en dehors on ne trouve que 17°,5. Il est limité d'une manière assez tranchée pour que le major Sabine, en le quittant, ait pu voir la température de la mer baisser de 6°,4 pendant deux heures de marche. Refoulé par le cap Saint-Roch, ce courant se partage en deux branches : la plus importante, célèbre sous le nom de *Gulf-Stream*, ou *courant du golfe* G (*fig.* 843), se dirige vers le nord avec une vitesse de 7 kilomètres environ par heure, s'enfonce dans le golfe du Mexique, traverse le canal de Bahama, où sa température est de 27°, longe le banc de Terre-Neuve, et, arrivé à la latitude de 49°, il tourne brusquement à l'est en se dirigeant vers l'Angleterre et la Norwège, où il apporte des débris de plantes empruntées aux rives américaines. Il descend ensuite le long de la côte occidentale de l'Europe et de l'Afrique pour revenir dans le grand courant des tropiques, parcourant ainsi un immense circuit, en trois ans et demi environ. — La branche, qui du cap Saint-Roch se dirige vers le sud, forme un courant d'eau chaude bien moins abondant que le courant du nord, le point de division se trouvant à 5 ou 6° au sud de l'équateur. M. Babinet trouve dans cette circonstance, qui se reproduit

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XXIV, p. 220.

dans le Grand-Océan, l'explication de ce fait que l'hémisphère austral est plus froid que l'hémisphère boréal (1112).

Un autre courant, dirigé aussi de l'est à l'ouest, règne dans le Grand-Océan. Refoulé par les îles de l'Océanie et les côtes occidentales de l'Inde, il se dirige en grande partie vers le nord en longeant la Chine et le Japon. L'autre partie suit les côtes orientales de l'Australie, puis revient vers l'est, et remonte le long de la côte occidentale de l'Amérique. Les eaux de la partie supérieure de la mer des Indes, ne changeant pas de place parce qu'elles n'ont pas d'issue, s'échauffent considérablement; ce qui explique les étés excessifs qui rendent le climat des Indes si meurtrier pour les Européens.

De Humboldt a reconnu, en 1802, un courant d'eau froide C (*fig.* 843) qui, partant des mers australes, longe les côtes du Chili et du Pérou, dont il refroidit le climat. Le thermomètre n'y marque que 15°,6 en certaines saisons, tandis qu'il monte à 27° ou 28° dans les eaux voisines en repos.

Indépendamment des courants généraux que nous venons de citer, il en existe beaucoup d'autres moins étendus. On admet aussi l'existence de contre-courants régnant au fond des mers profondes, et ramenant vers l'équateur les eaux refroidies des régions polaires. Ces courants ont pour effet de mêler les eaux des différentes mers, et de concourir ainsi à régulariser la distribution de la chaleur sur le globe. On ignore jusqu'à quelle profondeur se font sentir les courants superficiels; toutefois, elle peut être considérable, car il existe, sur la côte méridionale de l'Afrique, un courant qui se réfléchit sur le banc de Lagullas, à une profondeur de 110 à 130 mètres.

Hauts-fonds. — J. Williams et Franklin ont reconnu que l'eau est plus froide au-dessus des hauts-fonds qu'en pleine mer. H. Davy explique ainsi ce phénomène : pendant la nuit, les molécules d'eau refroidies par rayonnement descendent au fond; et dans les endroits peu profonds, elles s'accumulent assez près de la surface pour exercer une influence sensible sur sa température. De Humboldt pense que ce phénomène provient de ce que les couches inférieures et plus froides, en obéissant au mouvement général des mers, remontent les pentes et arrivent sur les hauts-fonds, dont elles abaissent ainsi la température. M. Saigey complète ainsi cette explication : les couches d'eau, inégalement échauffées, sont superposées sans être parallèles; elles se déplacent progressivement, en s'amincissant quand elles arrivent sur un relief, de manière qu'au-dessus, la température décroît plus rapidement quand on descend, que dans les endroits profonds où les couches ont plus d'épaisseur. Cela ne peut s'appliquer aux mers polaires, dans lesquelles la température peut augmenter avec la profondeur, ce qui porte à adopter de préférence l'explication de Davy. Quoi qu'il en soit, le phénomène dont il s'agit permet de substituer le thermomètre à la sonde, pour reconnaître la présence des hauts-fonds dans les endroits où il n'y a pas de courants prononcés.

Influence des côtes. — La température de la mer est modifiée par le voisinage des terres. L'eau semble un peu chaude le long des côtes de Norwége.

La Méditerranée, entourée de terres, est plus chaude que l'Océan. Dans les mers polaires, la proximité des côtes est une cause de refroidissement. MM. Ch. Martins et Pottier, lors du voyage de *la Recherche*[1], ont constaté l'influence refroidissante des côtes du Spitzberg, pendant que la corvette courait des bordées, dans lesquelles elle s'en rapprochait de 26 kilomètres au plus, et s'en éloignait jusqu'à 80 kilomètres. La température était de 1°,70, à une distance de moins de 40 kilomètres; de 2°,66 entre 40 et 60 kil., et de 3°,75 entre 60 et 80. M. Ch. Martins attribue ce résultat : 1° à l'air, qui, refroidi au contact des montagnes neigeuses de l'île, glisse sur les pentes jusqu'à la surface de la mer; 2° surtout à l'eau à 0° provenant de la fusion des glaciers qui remplissent les vallées du Spitzberg. Cette eau de fusion est en assez grande quantité pour diminuer la densité de la surface des mers arctiques quand il y a des glaces flottantes, comme M. Marcet l'a reconnu en comparant les résultats obtenus par Ross et Franklin, sur de l'eau de mer puisée à différentes profondeurs. Par exemple, la densité étant de 1,027 à la profondeur de 427^{m}, elle s'est trouvée égale à 1,026 à 144^{m}, tandis qu'elle n'était que de 1,022,5 à 1,024 à la surface. Le refroidissement de la mer autour du Spitzberg explique l'existence de la banquise de glace qui l'entoure pendant l'hiver, et qui s'étend progressivement en commençant à se former le long des côtes.

1133. Des glaces polaires. — Ces glaces ont été étudiées, principalement dans les mers arctiques, par Ross, Parry, Franklin, et surtout Scoresby, à qui on doit les observations les plus détaillées sur ce sujet. On a cru pendant longtemps que les glaces se formaient toujours le long des côtes. Il est vrai qu'il en est souvent ainsi, et l'on voit des glaces formées dans les baies profondes et entre les îles du Spitzberg se détacher et être poussées en pleine mer par les courants provenant de la fonte des neiges et des glaciers. Mais on ne pourrait expliquer ainsi l'immense quantité de glace qui recouvre les mers arctiques. Scoresby a constaté la formation de la glace en pleine mer, jusqu'à 20 lieues des côtes [2]. D'abord, la surface se recouvre d'une foule de petits cristaux, qui donnent à la mer l'aspect de l'eau mêlée de neige. La houle s'apaise aussitôt comme par enchantement; il reste cependant une faible agitation, qui brise les cristaux pendant qu'ils grossissent, et ils finissent par se souder les uns aux autres. Quand la mer est calme, la congélation est plus rapide, et la glace peut prendre 6 à 8^{cm} d'épaisseur en 24 heures. Elle s'accroît ensuite par dessous, et forme un *champ de glace*, qui peut avoir plusieurs centaines de lieues carrées. Tantôt la surface est unie, tantôt irrégulière et surmontée de distance en distance de monticules, nommés *hummock*, de 8 à 10^{m} de hauteur, souvent d'un éclat éblouissant relevé par une couleur verte ou bleue très délicate, qui se montre dans l'intérieur de petites excavations où la lumière se joue.

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XXIV, p. 220.

[2] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. V, p. 59.

Scoresby pense que les champs de glace des mers arctiques se forment entre le Spitzberg et le pôle. Cependant cette glace donne de l'eau douce; ce que Scoresby explique par l'accumulation, à sa surface supérieure, de neige qui fond pendant les étés pour se congeler ensuite et augmenter ainsi par le haut l'épaisseur du champ au moyen de glace d'eau douce. La glace des champs peut avoir jusqu'à 8^m d'épaisseur; la partie submergée est égale à quatre fois environ celle qui s'élève au-dessus de la surface de l'eau.

Les vagues sont quelquefois sans action sur les champs de glace; d'autres fois, elles les brisent, quelle que soit leur épaisseur, en fragments de 100 à 200 mètres carrés. Ces fragments, quand ils sont contigus, forment un *pack* ou *banquise*. Quand ils s'écartent assez pour donner passage à un navire, on dit que la mer est *ouverte*.

Les champs de glace ou les packs sont poussés vers la mer libre par les vents du nord et de l'ouest; ils forment des glaces flottantes qui parcourent quelquefois 50 lieues en un mois, et sur lesquelles les ours blancs accomplissent leurs pérégrinations. Souvent des champs de glace se rencontrent, entraînés par des courants contraires; ils se brisent alors avec un bruit épouvantable, des masses de glace sont lancées dans la mer, d'autres montent les unes sur les autres et forment des monticules de 10 ou 15 mètres de hauteur.

Les *montagnes de glace* sont formées par des masses gigantesques qui bouchent les vallées des côtes; elles sont ordinairement à pic du côté de la mer et présentent une couleur verte qui contraste avec la blancheur de la neige qui les recouvre. Des blocs énormes s'en détachent de temps à autre, soit par l'effet de leur poids aprés avoir été sapés par l'action des courants du sud, soit par l'expansion de l'eau qui se congéle dans leurs fissures. Si l'on peut expliquer ainsi la formation de quelques-unes des montagnes flottantes que l'on voit auprés du Spitzberg, on ne peut rendre compte de la même manière, de celles plus élevées que l'on rencontre dans la baie de Baffin. Scoresby en a observé, dans le détroit de Davis, qui avaient 10 à 12 kilom. carrés, et dont la surface plane supérieure s'élevait de 25 à 30^m au-dessus de l'eau, pendant que la partie inférieure s'enfonçait à 170 à 180^m. Des tours colossales surmontaient ces masses imposantes, dont le poids ne pouvait être de moins de 2 millions de tonnes. Scoresby pense qu'elles se forment et s'accroissent dans certaines baies garanties des vents et des courants, où elles peuvent séjourner pendant une longue suite d'hivers.

Les montagnes de glace deviennent trés fragiles quand la température de l'air s'élève au-dessus de 0°; on en a vu se fendre dans toute leur hauteur pour avoir été frappées d'un coup de hache. Malheur au navire qui se trouve dans le voisinage; il est écrasé par les débris, ou submergé dans l'agitation violente des eaux qui suit la catastrophe.

1134. TEMPÉRATURE DES LACS ET DES RIVIÈRES. — L'échauffement de la surface des lacs profonds se fait comme celui de la mer; seulement les eaux étant moins agitées et n'étant pas continuellement mélangées par des courants, les

variations annuelles sont plus prononcées que sur la mer. Ainsi, la surface peut se congeler pendant l'hiver, et sa température s'élever jusqu'à 25°, pendant l'été.

La distribution de la température dans une même colonne verticale est aussi modifiée par le maximum de densité, qui n'existe pas dans l'eau de mer au-dessus du point de congélation (855). Dans les lacs profonds, on trouve à une certaine profondeur une température constante de 4° à peu près, à partir de laquelle la température s'élève à mesure qu'on se rapproche de la surface. Il résulte de ce fait, constaté pour la première fois par de Saussure dans les lacs de la Suisse (856), que la surface d'un lac ne peut se congeler qu'après que toute sa masse a passé par la température de 4°. Cependant, comme l'équilibre des couches liquides ne s'établit qu'avec lenteur, un froid soudain et rigoureux peut faire congeler la surface, pendant que les couches inférieures possèdent encore des températures plus élevées que 4°.

Dans les rivières, le mouvement de l'eau, les inégalités du fond et des rives qui déterminent des remous, tendent à rendre la température uniforme. Aussi, cette température ne changerait-elle que peu à la surface pendant toute l'année si la baisse des eaux pendant l'été ne venait, le plus souvent, mettre à découvert une partie du fond, et ne laisser qu'une couche peu épaisse de liquide dans les autres parties. Pendant l'hiver, la congélation ne peut avoir lieu avant que toute la masse ne soit descendue à 0°, si ce n'est peut-être dans des cavités profondes, où l'eau est stagnante et peut rester à 4°.

1135. Glaçons charriés. — Les glaçons que charrient les rivières pendant l'hiver, peuvent provenir de glace, formée à la surface le long des rives, puis brisée accidentellement ou par l'effet d'un abaissement de niveau. Ces glaçons, qui s'arrondissent en se heurtant, peuvent aussi sans doute se former à la surface et loin des bords, comme cela a lieu sur la mer, mais on ne pourrait expliquer ainsi la quantité immense de glaçons que charrient certains fleuves, et il paraît bien prouvé que la plupart prennent naissance au fond de l'eau. Plot est le premier qui ait émis cette opinion; il s'appuyait sur le témoignage des bateliers de la province d'Oxfort. Hales rapporte que des bateliers avaient retiré avec leurs crochets de gros glaçons qui reposaient sur le fond de la Tamise. En 1743, Nollet reconnut que les glaçons sont composés de deux couches, l'une de glace compacte placée en dessus, l'autre spongieuse irrégulière et remplie de graviers, et de divers débris empruntés au fond de la rivière; cependant il n'adopta pas l'opinion de Hales. Desmarest, Brauns, ont pris la nature sur le fait[1]: Desmarest vit les glaçons se former dans un canal dépendant de la papeterie de Mongolfier à Annonay, et après s'être traînés quelque temps sur le fond, venir flotter à la surface. Il rapporte aussi qu'un ponton submergé au fond du Leck et qu'on n'avait pu en retirer, vint flotter à

[1] *Journal de physique*, 1783, t. I, p. 30; et 1788, t. II, p. 59.

la surface l'hiver suivant, supporté par un énorme glaçon. Brauns a vu des glaçons s'élever du fond de l'Elbe, et il a constaté l'existence de bancs de glace au fond de ce fleuve. Ces sortes d'observations ont été répétées depuis par d'autres physiciens.

Il nous reste à expliquer comment les glaçons prennent naissance et s'accroissent au fond des rivières avant de venir flotter à la surface : Quand il fait grand froid, l'eau descend au-dessous de 0°, et, par suite des mouvements qui en mélangent toutes les parties, le fond prend la même température. Cependant la congélation n'a pas lieu, à cause de l'agitation (916). Mais l'eau emprisonnée entre les graviers et les débris de diverses sortes du fond, se trouve dans un repos qui lui permet de se congeler. Les parcelles de glace ainsi formées servent de noyaux, autour desquels la congélation continue, de manière que les glaçons s'accroissent en soulevant l'eau de la rivière, au point quelquefois de la faire déborder et même de former des îlots fixes de glace qui dépassent le niveau. Les glaçons sont d'abord retenus au fond, soit parce qu'ils sont soudés à des corps fixes, soit parce qu'ils sont chargés par les graviers qu'ils retiennent; ils montent à la surface quand leur volume est devenu assez grand pour que la poussée du liquide puisse les soulever. Tout adoucissement dans la température fait détacher les glaçons, en déterminant un commencement de fusion qui détruit l'adhérence au fond, ou fait détacher les graviers soudés en dessous. On a remarqué, en effet, sur la Seine et sur la Marne, que les glaçons flottants sont plus nombreux quand le soleil vient réchauffer l'eau. On n'a jamais vu les glaçons se former au fond des eaux stagnantes; cela tient à ce que la température du fond doit être à 4°, ou, plus généralement, supérieure à 0°, quand la glace peut déjà se former à la surface. Cette glace préserve ensuite du refroidissement les couches qu'elle recouvre, en leur cédant sa chaleur latente à mesure que son épaisseur augmente en dessous.

Les explications qui précèdent sont dues à Desmarest; elles ont été confirmées par Brauns. Ce dernier a constaté que la glace ne se dépose pas également sur tous les corps placés au fond des rivières. Les corps rugueux, le chanvre, la laine, le crin, les métaux, les pierres raboteuses en sont promptement entourés. Les résines, la cire d'Espagne, la soie, le cuir tanné... ne donnent pas prise à la glace. Il est à remarquer que ces derniers corps conduisent mal la chaleur.

Quand par un froid vif et prolongé, les glaçons se soudent et forment une croûte de glace qui recouvre la rivière dans toute sa largeur, on dit qu'elle est *prise*. La glace augmente alors d'épaisseur par dessous, d'abord assez rapidement, puis lentement, à cause de l'imparfaite conductibilité de la glace, qui empêche le froid de pénétrer à travers son épaisseur. Les couches de glace qui se forment pendant les nuits successives sont du reste assez distinctes pour qu'on puisse les compter. Dès que la glace atteint une épaisseur de 50 centimètres, elle peut supporter des voitures lourdement chargées, pourvu qu'elle

reste continue et qu'elle s'appuie sur l'eau. Souvent la glace se fend avec explosion, par suite des variations irrégulières de volume qu'elle éprouve pendant les changements de température.

§ 2. — DES MOUVEMENTS DE L'ATMOSPHÈRE ET DES VENTS.

I. Du vent en général et des instruments anémométriques.

1136. Du vent en général. — Le vent n'est autre chose que de l'air qui se transporte d'un lieu dans un autre. Epicure disait que c'est de l'air qui coule. L'étude de ce météore a beaucoup d'importance en climatologie; car, la direction des vents dominants, leur fréquence, leur force, leur état habituel de sécheresse ou d'humidité, ont une grande influence sur la végétation. Par exemple, à l'Ile-de-France, le vent du sud-est est tellement contraire aux arbres, que jamais on ne voit de fruits du côté exposé à son influence. L'Algérie est exposée à deux courants opposés, l'un inférieur venant du nord, et les revers des montagnes exposés à son action ne présentent que des broussailles rabougries; l'autre supérieur venant du désert, qui empêche les peupliers et la plupart des arbres aborigènes de s'élever au-delà de 10 à 12^m quand ils ne sont pas abrités; arrivés à cette hauteur, leur cime s'aplatit en dessus et s'étend en largeur. Les vents agissent encore, en transportant à de grandes distances la chaleur ou le froid des régions qu'ils ont traversées; ils adoucissent certains climats, assainissent les villes et les contrées marécageuses; ils transportent à de grandes distances des graines et le pollen des fleurs. Sans le phénomène du vent, il ne tomberait pas de pluie sur les continents, comme nous le verrons bientôt.

La navigation est surtout intéressée à l'étude des vents. Depuis quelques années, on s'attache à observer leur direction dans toutes les parties du monde, et l'on a reconnu qu'ils sont assujettis à une marche générale, comme les courants de la mer; les fluctuations irrégulières qu'on observe habituellement doivent être comparées aux remous et aux tourbillons qui se produisent dans les eaux. Le capitaine Maury, après avoir tracé la carte des courants marins, s'est proposé de faire la *carte de l'air*. Déjà, en s'appuyant sur les observations qu'il a rassemblées, on peut abréger considérablement la durée de certains voyages; par exemple, on a réduit presque de moitié le temps nécessaire pour aller des Etats-Unis au cap Saint-Roch, et de un tiers celui qu'il faut pour aller du même pays en Californie.

On divise les vents en *vents réguliers* et *vents irréguliers* ou *accidentels*. Les premiers sont naturellement les plus importants à étudier. Il y a à considérer dans le vent, *sa direction* et *sa vitesse de translation*.

1137. DIRECTION DU VENT. — Les anciens ne considéraient que quatre directions du vent, correspondant aux quatre points cardinaux. Aujourd'hui, on distingue 32 directions équidistantes, dont le tracé se nommela *rose des vents*. La *fig.* 831 représente la forme qu'on lui donne ordinairement dans les boussoles. Chaque vent se désigne par le point de l'horizon d'où il souffle, d'après les règles qui suivent :

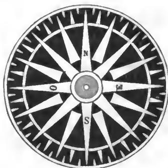


Fig. 831.

Nomenclature des vents. — Les vents qui viennent des quatre points cardinaux en prennent simplement les noms. Ceux qui soufflent dans les directions moyennes se désignent en réunissant les noms des deux points cardinaux qui les comprennent. Les huit autres, intermédiaires aux précédents, se désignent aussi en associant les noms des deux vents les plus rapprochés, en ayant soin de nommer le premier le vent principal. Enfin, on considère encore 16 directions intermédiaires, qui se désignent au moyen des huit vents principaux : on place d'abord le nom du vent dont la direction s'éloigne le moins de celle que l'on veut indiquer, puis le nom du plus éloigné, en le faisant précéder de la fraction $\frac{1}{4}$. Voici le tableau des noms des vents. Les mots *nord*, *sud*, *est*, *ouest*, y sont indiqués par leur initiale, et chaque ligne correspond à un quart de la rose :

NORD,	$n\frac{1}{4}ne$,	N.NE,	$ne\frac{1}{4}n$,	NE,	$ne\frac{1}{4}e$,	E.NE,	$e\frac{1}{4}ne$,	EST.
EST,	$e\frac{1}{4}se$,	E.SE,	$se\frac{1}{4}e$,	SE,	$se\frac{1}{4}s$,	S.SE,	$s\frac{1}{4}se$,	SUD.
SUD,	$s\frac{1}{4}so$,	S.SO,	$so\frac{1}{4}s$,	SO,	$so\frac{1}{4}o$,	O.SO,	$o\frac{1}{4}so$,	OUEST.
OUEST,	$o\frac{1}{4}no$,	O.NO,	$no\frac{1}{4}o$,	NO,	$no\frac{1}{4}n$,	N.NO,	$n\frac{1}{4}no$,	NORD.

Chaque intervalle se nomme un *rhumb*. Quand le vent change de direction, on dit qu'il saute de un ou plusieurs rhumbs. Quand on veut déterminer avec plus de précision la direction du vent, on se sert des degrés de la circonférence : on indique d'abord, au moyen des lettres N ou S, si le vent vient de l'hémisphère nord ou de l'hémisphère sud ; puis on fait connaître le nombre de degrés dont sa direction s'écarte du méridien du côté de l'est ou de l'ouest ; par exemple, un vent désigné par les initiales N. 15°O, vient d'un point situé entre le *nord* et l'*ouest*, et il s'écarte de 15° du méridien.

1138. Manière de connaître la direction du vent. — Il règne à de très grandes hauteurs des courants d'air, qui souvent soufflent en sens opposé des vents de terre. Le mouvement des nuages fait connaître la direction des

courants élevés. Pour ceux qui soufflent près de la surface de la terre, on emploie différents appareils nommés *anémoscopes*.

Anémoscopes. — Le plus simple est la girouette ordinaire, mais elle n'est pas généralement assez mobile pour obéir aux faibles agitations de l'air ; de plus, sa position au sommet d'un édifice en rend l'observation fort incommode. Dans les observatoires, on dispose la girouette de manière que sa tige tourne avec la lame ; cette tige est maintenue par un anneau fixé au toit, qu'elle traverse, et s'appuie, par son extrémité inférieure qui forme pivot, sur un support placé dans la salle des observations. Une aiguille, fixée au bas de la tige parallélement à la lame, en indique les différentes positions sur un cercle horizontal. Quelquefois le mouvement de la tige est communiqué, par un engrenage, à l'axe horizontal d'une aiguille qui parcourt un cadran vertical. Cette disposition est plus commode, mais elle ôte de sa mobilité à l'appareil.

En comparant la direction que suit la fumée qui sort des cheminées, avec la position d'une girouette, on observe souvent que cette derniére n'obéit pas aux faibles courants d'air. Pour donner une grande sensibilité à l'appareil, M. Taupenot fixe la lame à un tube fermé par le haut, dans lequel entre la tige fixe de la girouette. A l'extrémité de cette tige est une sphère sur laquelle s'appuie, par sa partie concave, un hémisphère d'un plus grand diamétre, qui termine le tube. On voit cette disposition dans la *fig*. 836.

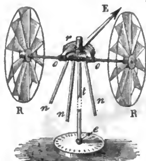


Fig. 832.

Un des anémoscopes les plus sensibles est l'anémoscope à ailettes de M. Piazzi-Smyth, perfectionné par M. Salleron. Un plateau circulaire *r* garni de dents (*fig*. 832) est fixé horizontalement sur les trois supports *n*, *n*, *n* ; à son centre est disposé un arbre vertical *t* pouvant tourner sur lui-même, et portant deux bras horizontaux terminés par des coussinets *o*, *o*, dans lesquels tourne l'arbre *oo* des deux roues R, R. Cet arbre *oo* porte une vis sans fin, dont le filet s'engage dans les dents du plateau fixe *r*. Les roues R, R portent des ailettes obliques au moyen desquelles le vent les fait tourner ; alors, la vis sans fin prenant son appui sur les dents du plateau fixe *r*, l'arbre *oo* se déplace avec les roues RR, de manière à rester toujours tangent au plateau *r*, jusqu'à ce que les roues se trouvent dans la direction du vent ; alors ce dernier n'ayant plus de prise pour les faire tourner, l'appareil s'arrête, et les aiguilles E et *e*, perpendiculaires à l'arbre *oo*, indiquent la direction du vent. L'appareil est très sensible, parce que les frottements sont vaincus trés facilement par la puissance mécanique de la vis, et d'autant plus facilement que le diamétre des roues R, R est plus grand.

Dans les voyages, quand on n'a pas d'anémoscope à sa portée, on peut

reconnaître assez exactement la direction du vent en levant un doigt verticalement après l'avoir mouillé : on éprouve une sensation de froid du côté d'où vient le vent, parce que l'évaporation est activée de ce même côté.

Anémoscopes enregistreurs. — Nous citerons d'abord l'anémoscope de d'Ons-en-Bray, d'autant plus volontiers qu'il constitue le premier exemple d'un appareil enregistrant ses propres indications. Il consiste en une girouette dont la tige tourne avec le limbe. Cette tige est garnie vers le bas d'un cylindre dans lequel sont implantés, suivant une hélice, 25 crayons de même longueur et équidistants. Une bande de papier, qu'un mouvement d'horlogerie fait marcher régulièrement dans le sens horizontal, est effleurée par un des crayons, qui trace alors un trait horizontal sur la bande mobile. La hauteur du trait fait connaître quel est le crayon qui touchait au papier, et sa longueur montre pendant combien de temps la girouette a conservé la même direction.

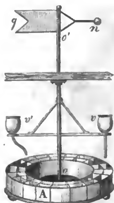


Fig. 833.

Le P. Beaudoux a imaginé l'anémoscope de la *fig.* 833. Le limbe *g*, équilibré par la masse *n*, entraîne dans son mouvement l'arbre vertical *o'o*; cet arbre porte un entonnoir *v* rempli de sable, qu'il laisse tomber dans une des cases disposées circulairement autour du cylindre A. Un second entonnoir *v'*, disposé comme le premier et destiné à l'équilibrer, jette du sable dans une seconde couronne de cases. La quantité de sable qu'il y a dans les cases fait connaître combien de temps la girouette s'est tenue dans les positions qui leur correspondent. Cet instrument ingénieux est trop pesant pour être sensible.

1139. VITESSE DU VENT. — La vitesse du vent est très variable. Voici les termes généralement adoptés pour la désigner :

DÉNOMINATIONS.	VITESSE en 1s.	EN LIEUES par heure.	DÉNOMINATIONS.	VITESSE en 1s.	EN LIEUES par heure.
Vent à peine sensible.	0m,5	0l,40	Vent très fort......	20m,0	16l,20
Vent sensible	1,0	0,81	Tempête..........	22,5	17,35
Vent modéré.......	2,0	1,62	Grande tempête.....	27,5	22,04
Vent assez fort.....	5,5	4,45	Ouragan..........	36,0	29,33
Vent fort.........	10,0	8,16	Ouragan violent....	45,0	36,62

Les marins appellent *vent frais* celui qui parcourt 10m en 1s, *grand frais* le vent de 15m, *très grand frais* celui de 20m. Ils nomment *tempête*, un vent de 25 à 30m, et *ouragan* celui de 35 à 45m. Un ouragan de 45m, non seulement déracine les plus gros arbres, mais encore est capable de renverser des édifices solidement construits.

1140. Mesure de la vitesse du vent. — Quand il s'agit des vents qui soufflent à une grande hauteur, on observe l'espace que l'ombre des nuages parcourt sur le sol dans un temps donné. La vitesse des vents de terre peut s'évaluer au moyen de corps légers que le vent emporte horizontalement : on observe le temps qu'ils mettent à franchir l'espace qui sépare deux jalons plantés à une distance connue. Il est plus commode de se servir d'instruments particuliers nommés *anémomètres*. On en a imaginé un grand nombre ; nous allons décrire les plus importants.

Anémomètres de pression. — L'instrument de la *fig.* 834 a été imaginé par Bouguer : P est une plaque que l'on oppose à l'action du vent ; elle est munie d'une tige *t* qui traverse le tube fixe *r*, et qu'un ressort à boudin repousse continuellement. La plaque s'approche d'autant plus du tube, que le vent est plus violent, et une division tracée sur la partie *t* de la tige fait connaître de combien le ressort a cédé. Souvent la tige porte des dents obliques, entre lesquelles s'engage l'extrémité d'un léger ressort, qui empêche la plaque de revenir sur ses pas quand le vent s'affaiblit. Quelquefois aussi ces dents s'engagent dans celles d'un pignon portant une aiguille qui parcourt les divisions d'un cadran. — On gradue la tige *t* en plaçant l'instrument de manière que la plaque soit horizontale, et on la charge successivement de différents poids. On trouve facilement ensuite quelle charge équivaut à la force du vent sur un centimètre carré.

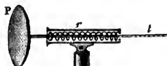


Fig. 834.

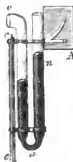


Fig. 835.

Pour passer de la force du vent à sa vitesse, il faut recourir à des expériences directes. C'est ce qu'a fait Borda. Il a d'abord reconnu que la grandeur de la plaque, et sa forme à égalité de surface, ont une influence marquée sur la force, par centimètre carré, qui correspond à une vitesse donnée ; ce qu'on doit attribuer aux remous et aux inflexions de l'air près des bords. Si l'on désigne par F la force du vent sur un millimètre carré exprimée en kilogrammes, par V sa vitesse, et par S la surface de la plaque en millimètres carrés, on aura $F = c \times SV^2$; *c* est un coefficient constant pour une même plaque, et qui augmente en même temps que son étendue. D'après les expériences de Borda, les valeurs de *c* sont 0,92 ; 1 ; 1,04, pour des plaques de 11664, 26244, 59049 millimètres carrés. M. Rouse a trouvé $c = 1{,}20$ pour une plaque de 929000^{mm} carrés.

Dans l'anémomètre de M. Lind (*fig.* 835), la force du vent soulève une colonne liquide. *nao* est un tube recourbé en siphon, contenant de l'eau ou du mercure. Ce tube peut tourner autour de la tige *cc*, sous l'influence du vent

qui agit sur la lame A. L'air s'engouffre par l'ouverture *o*, et fait monter le niveau *n* d'une quantité qui dépend de sa vitesse.

Une autre espèce d'anémomètre consiste en une simple plaque rectangulaire tournant autour de son côté horizontal supérieur, que l'on place perpendiculairement à la direction du vent. La plaque s'incline et se relève par le bas, et finit par s'arrêter dans une position qui permet d'apprécier la force du vent. M. Taupenot a perfectionné cet anémomètre, comme on le voit dans la *fig.* 836. La plaque indicatrice *ol* est à cheval sur la lame *cab* d'une girouette très sensible, de manière que son axe *o* lui soit perpendiculaire. Des dents adaptées au bord de la girouette, qui a la forme d'un quart de cercle, permettent d'observer de loin l'inclinaison que prend la plaque *ol*. De cette inclinaison, on conclut la vitesse du vent, en s'appuyant sur des expériences directes que l'on fait en transportant l'appareil dans un air calme, avec des vitesses connues; ou bien en comparant les états successifs qu'il prend, avec la vitesse du vent mesurée au moyen de corps légers.

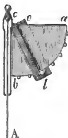


Fig. 836.

Anémomètres de rotation. — Dans ces anémomètres, dont la première idée est due à Wolf, le vent agit sur un moulinet à ailettes obliques, et le fait tourner avec une rapidité qui dépend de sa vitesse. Dans l'*anémomètre de Wolfmann*, l'arbre du moulinet est placé sur le prolongement de la lame d'une girouette et du côté du vent, de manière que l'appareil s'oriente de lui-même. Une vis sans fin fait marcher un compteur, qui indique le nombre de tours accomplis pendant un temps donné. Au moment où l'on commence à compter les secondes, on laisse partir le moulinet en déplaçant, au moyen d'un cordon, un levier qui retient l'une des ailettes. On fait une manœuvre inverse quand on veut arrêter l'appareil. Pour déduire du nombre de tours, la vitesse du vent, on construit une table donnant les nombres de tours qui correspondent à différentes vitesses observées directement au moyen de corps légers, ou en transportant l'appareil, comme il a été dit ci-dessus.

L'anémomètre de Wolfmann a été perfectionné par M. Combes et par M. Morin. La *fig.* 837 représente l'anémomètre à main de MM. Morin et Bianchi. Cet instrument perfectionné suffira pour donner une idée de tous les autres. Sur un tambour cylindrique muni d'un manche que l'on tient à la main, se trouve une plaque *p'p* qui porte tout le mécanisme. Cette plaque peut tourner autour de l'axe du tambour, dont on voit une coupe en P'P. OO' est l'arbre d'un moulinet à ailettes héliçoïdes; il est muni d'une vis sans fin qui fait marcher un compteur. Cette vis commande d'abord la roue à 100 dents *r'*, dont l'axe porte une aiguille qui marche sur un cadran *c'*, dont chaque division correspond à un tour du moulinet. La roue *r'* mène, au moyen d'une seconde vis sans fin, la roue *r*, dont l'aiguille indique sur le cadran *c*, les tours de la roue *r'* ou les centaines de tours du moulinet. Enfin, les tours de la roue *r* sont

comptés par la roue à chevilles *h*, dont une cheville passe devant l'index *α* à chaque tour de la roue *r*, qui porte 100 dents. Chaque cheville correspond donc à 100 tours de la roue *r'*, ou à 10000 tours du moulinet. On commence par orienter l'appareil, dont on voit l'ensemble dans le croquis A, en plaçant convenablement la plaque *p'p* et l'élevant au bout du bras, de manière que l'arbre OO' soit dans la direction du vent. Quand le moulinet a pris la vitesse maximum, on pousse un bouton placé à l'extrémité du manche; et l'aiguille marque un point noir sur chacun des cadrans *c*, *c'*. On marque un second point au moment où l'on arrête le chronomètre qui sert à mesurer le temps. De cette manière, la vitesse de l'appareil est constante pendant toute la durée de l'expérience, tandis que, dans les autres anémomètres de rotation, le mouvement va

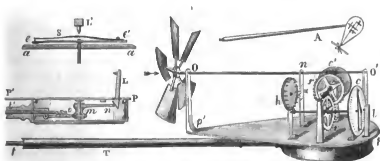


Fig. 837. — 1/3.

d'abord en s'accélérant quand on part de l'état de repos, ou bien il éprouve un ralentissement au moment où l'on engage la vis sans fin dans les dents de la première roue du compteur. Le mécanisme qui sert à pointer en poussant le bouton, est représenté en coupe en *aa* et P'P. *aa* est un des cadrans et *ee'* son aiguille portant le ressort S, terminé en *e* par une pointe qui traverse un chas pratiqué à l'extrémité de l'aiguille et rempli d'encre. Un levier L' est chargé de presser le ressort; on le voit d'autre part en L et en *l*. La tige *t*, *t'*, renfermée dans le manche de l'appareil, fait monter, quand on la pousse, le levier *om*, dont le point d'appui est sur le manche, et dont l'autre extrémité, terminée en fourchette, entoure le manchon *m*. Celui-ci, qui glisse le long de l'axe de la plaque P'P, est alors soulevé, et l'extrémité en biseau du bras *mn* agissant sur un plan incliné qui termine le levier L à sa partie inférieure, l'extrémité supérieure de ce levier s'avance vers la gauche. Le levier L, *l* presse alors en son milieu le ressort S. La pointe *e* traverse le chas rempli d'encre, et vient marquer un point sur ce cadran. Un second bras, semblable à *mn* et porté par le manchon *m*, agit de même et au même instant sur le ressort de l'aiguille du cadran *c'*. Dès qu'on lâche la tige *t*, elle revient en arrière par l'effet d'un ressort à boudin.

Anémomètre du Dr Robinson. — Cet appareil est représenté dans la *fig.* 838. Les hémisphéres creux qui terminent les 4 bras étant disposés de manière que l'ouverture de chacun d'eux regarde la partie convexe de celui qui le suit, le systéme tourne sous l'action du vent, et un compteur donne le nombre de tours. D'aprés l'inventeur, ce nombre est toujours proportionnel à la vitesse du vent; et quand les bras sont assez longs pour que le frottement sur l'axe soit insensible, la vitesse de translation des hémisphéres est égale au tiers de la vitesse du vent. Si donc R est le rayon du cercle décrit par le centre des hémisphéres, la vitesse du vent correspondant à n tours par minute sera $3 \times 2\pi R \cdot n$.

1141. Anémomètres enregistreurs. — M. Liais a donné la description d'un anémomètre qui donne au bout de la journée les différentes directions des vents qui se sont succédé, leurs durées et leurs intensités[1]. Cet instrument est analogue à celui de la *fig.* 833; seulement il n'y a qu'un entonnoir, qui reçoit de l'eau venant d'un vase de Mariotte. Pour marquer l'intensité, l'eau de l'entonnoir tombe d'abord dans une auge très allongée glissant dans une rainure horizontale parallèle à la girouette. Cette auge est liée par un système de leviers articulés, à un anémomètre *de pression* qui la rapproche de l'axe de la girouette, d'autant plus que le vent est plus fort. Un orifice pratiqué dans l'auge laisse alors tomber l'eau dans les cases de différentes couronnes concentriques. La couronne à laquelle appartient la case qui a reçu l'eau fait connaître l'intensité du vent quand il avait la direction qui correspond à la place de cette case sur la circonférence. La quantité d'eau recueillie apprend pendant combien de temps le vent a soufflé avec cette intensité.



Fig. 838.

Anémométrographe de M. Taupenot. — Cet appareil enregistreur donne en même temps la direction et la force du vent; sa partie supérieure est représentée dans la *fig.* 839. H*tb* est une girouette pouvant tourner dans le châssis fixe *mn*. L'axe de cette girouette est un tube *tb* qui repose par son extrémité *b*, terminée par une boule d'ivoire, dans une cavité sphérique en porcelaine *c*, dont le fond est percé, ainsi que la boule d'ivoire. La lame de la girouette est circulaire; elle peut tourner autour de son centre *o*, qui est traversé par un axe s'appuyant sur deux bras K*o*, fixés au tube *tb*. Une palette *a*, poussée par le vent quand la girouette est orientée, fait tourner le disque autour de l'axe *o* et s'arrête dans diverses positions *a'*, *a''*..., suivant la force du vent. En même temps une chaîne s'enroule sur le contour du disque et fait monter un fil métallique *ff* qui soutient une aiguille horizontale *e* placée dans le cabinet d'observation. Cette aiguille, en s'élevant plus ou moins, indique la force du vent; en même temps, elle tourne comme la girouette et en fait

[1] *Comptes-rendus des séances de l'Académie des sciences* de Paris, t. XXXIV.

connaître la direction. Ainsi disposé, l'appareil se nomme ***anémomètre de transmission***. Dans l'appareil que M. Taupenot a établi au prytanée de Laflèche, le fil *ff* a 36ᵐ de longueur et n'éprouve pas de torsion.

Quand on veut que l'appareil enregistre la direction et la force du vent, on attache à l'extrémité inférieure du fil *ff* une baguette cylindrique KK′ (*fig.* 840). Cette baguette traverse des ouvertures ménagées dans un flotteur *f*, et dans le fond de la caisse dans laquelle il flotte. Une aiguille *ee′* fixée au flotteur est aussi traversée par la baguette KK′. On voit en E le milieu de cette aiguille, et en *o* la section de la baguette. Celle-ci porte une rainure longitudinale dans laquelle s'enfonce un appendice *c* appartenant à l'aiguille, de manière qu'elle obéisse au mouvement de rotation de la baguette sur elle-même quand la girouette change de direction ; et que cette baguette puisse cependant monter ou descendre, suivant la force du vent. La direction du vent est pointée sur une bande de papier *nn* au moyen d'un crayon *e′a*. Un mouvement d'horlogerie fait marcher la bande de papier et fait périodiquement abaisser le flotteur, de manière à appuyer la pointe du crayon sur le papier. La force du vent est tracée sur le cylindre vertical CC′, qui tourne régulièrement sur lui-même. Un léger châssis *rtt′r′*, soutenu par un fil qui ne présente pas de résistance sensible à la torsion, monte et descend en même temps que la baguette KK′. Ce châssis est guidé en α, α′, et le crayon *r′*, légèrement pressé par un ressort, trace sur le cylindre CC′ une courbe dont les ordonnées dépendent de la force du vent. M. Taupenot est parvenu à rendre ces ordonnées proportionnelles à cette force, en enroulant un fil attaché en K′ sur un disque R portant un levier courbe *l* enveloppé par un cordon que tire un poids *p*. La courbure du levier *l* est telle que la résistance variable du contrepoids *p* rend les déplacements angulaires de la lame *a* (*fig.* 839) proportionnels à la force du vent. En donnant à la girouette supérieure un diamètre de 40ᶜᵐ, on dispose de 35ᶜᵐ pour les ordonnées, et chaque mètre de vitesse

Fig. 839.

Fig. 840.

du vent correspond à 1^{cm}. M. Taupenot a vu l'appareil fonctionner sans se déranger, par les plus violentes tempêtes, et en enregistrer toutes les phases avec une grande fidélité.

On conçoit facilement comment on pourrait enregistrer les positions des crayons r et a au moyen de la *photographie*. Il existe aussi des anémomètres enregistreurs dans lesquels on emploie l'électro-magnétisme; nous en parlerons plus tard.

1142. De la direction moyenne des vents. — Les notations adoptées pour désigner les vents se prêtent difficilement au calcul des moyennes. C'est là une des causes qui empêche de tirer des observations anémométriques tout le parti dont elles semblent susceptibles. Voici comment Lambert a considéré la direction moyenne des vents.

Supposons qu'un courant d'air venant du nord passe par le point C (*fig.* 841) avec une vitesse v pendant un temps t, la masse d'air qui passera sera proportionnelle à vt. Si un autre courant venant du sud souffle ensuite avec une vitesse v' et pendant un temps t', il ramènera une masse d'air égale à $v't'$; de sorte que le résultat sera le même que si une masse d'air $vt - v't'$ était passée par le point C pendant le temps $t + t'$. Si donc on représente par N et S les masses d'air venant du nord et du sud, le résultat sera représenté par N — S. Si la différence est positive, le vent résultant sera dirigé du nord au sud; et du sud au nord, si elle est négative. Si nous considérons de même les vents d'est et d'ouest, le vent résultant sera E — O, dirigé de l'est à l'ouest quand cette différence sera positive. Les résultats N — S et E — O étant considérés comme des forces cb, ca (*fig.* 841), nous pourrons chercher leur résultante CR. L'angle V qu'elle fera avec la méridienne NS sera donné par la formule

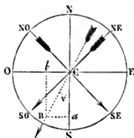


Fig. 841.

$$\text{tang}\, V = \frac{Ra}{Ca} = \frac{Cb}{Ca} = \frac{E - O}{N - S}.$$

Si nous considérons maintenant les huit vents principaux, nous pourrons décomposer les quatre vents N.E, N.O, S.E, S.O, chacun en deux autres, dirigés l'un suivant la méridienne, l'autre suivant la droite OE. Ainsi, le vent du *nord-est* se décompose en deux autres, l'un suivant CS représenté par NE cos 45°, l'autre suivant CO et égal aussi à NE cos 45°; ces deux composantes sont positives. Le vent de *nord-ouest* donne les composantes NO cos 45° suivant CS, et — NO cos 45° suivant CE. Le vent de *sud-est* donne les composantes — SE cos 45° suivant CN, et SE cos 45° suivant CO. Enfin, le vent du *sud-ouest* donne — SO cos 45° suivant CN, et — SO cos 45° suivant CE.

En réunissant les composantes qui sont dirigées suivant le méridien, aux vents du nord et du sud, et celles qui soufflent suivant la ligne OE, aux vents d'est et d'ouest, on aura

$$\tan V = \frac{E - O + (NE + SE - NO - SO) \cos 45^\circ}{N - S + (NE + NO - SE - SO) \cos 45^\circ}.$$

Telle est la formule de Lambert. Les signes du numérateur et du dénominateur de la valeur de *tang* V font connaître le sens des composantes *Cb* et *Ca*, et par suite l'angle droit dans lequel est dirigée la résultante.

La *vitesse moyenne* du vent résultant est donnée par la formule

$$R = \frac{Cb}{\sin V} = \frac{E - O + (NE + SE - NO - SO) \cos 45^\circ}{\sin V}.$$

Ordinairement, dans le calcul de tang V, on ne tient pas compte de la vitesse des différents vents, et l'on représente par les signes NS,... NE, SE... les nombres de fois sur 1000 que chacun des vents a soufflé. Cette manière de procéder suppose que les vitesses moyennes sont à peu près les mêmes dans toutes les directions, ce qui est loin d'avoir lieu. Mais les difficultés que présentaient les mesures des vitesses, avant l'invention des nouveaux anémomètres, avaient conduit à procéder de cette manière.

M. Schouw cherche à se rendre compte de la moyenne direction des vents par une autre méthode : il compare par différence les nombres de fois sur 1000 qu'ont soufflé les vents du nord (NO, N, NE), et les vents du sud (SO, S, SE) ; il compare de même les vents d'est (NE, E, SE) aux vents d'ouest (NO, O, SO), et il reconnaît, de cette manière, si le vent a soufflé plus fréquemment du nord que du sud, et de l'est que de l'ouest.

1143. Causes générales des vents. — L'explication des vents est toute moderne. On a admis dans l'antiquité qu'ils sortaient de l'intérieur de la terre, principalement dans les pays de montagnes, et que certaines cavernes étaient destinées à leur fournir une issue. Il y a bien en effet des cavernes d'où il s'échappe des courants d'air assez rapides, mais on sait qu'ils sont dus à un effet de *tirage* produit par la différence de niveau de plusieurs ouvertures. C'est à Hadley et Franklin que sont dues les premières notions exactes sur les causes du vent, qui provient le plus souvent de la distribution inégale de la chaleur à la surface de la terre.

Considérons une région assez étendue ACB (*fig.* 842), dans laquelle la surface du sol est différemment garnie : en C elle est dénudée et susceptible de s'échauffer fortement ; en A et B, elle est humide ou couverte de végétation. L'air qui recouvre la partie C étant plus dilaté que celui qui l'entoure montera et sera remplacé par l'air qui affluera horizontalement des régions A et B. Il y aura donc des courants dirigés dans le sens des flèches. En même temps la colonne d'air dilatée *abnm* s'élevant au-dessus de la limite *mn* des colonnes

voisines, se déversera sur elles de chaque côté, dans le sens des flèches *s* et *r*, de manière à engendrer des courants supérieurs qui marcheront en sens contraire des vents de terre *Ab*, *Ba*, et donneront lieu, à une certaine distance, à des courants descendants, pour remplacer l'air de la partie inférieure qui se dirige vers le point échauffé.

A l'appui de cette explication Franklin cite l'expérience suivante : On place une bougie au bas d'une porte ouverte séparant deux chambres ayant des températures différentes ; et l'on voit la flamme s'incliner du côté de la chambre la plus chaude. Le contraire a lieu quand on place la bougie tout en haut. Enfin, entre les deux courants opposés ainsi constatés, on trouve une couche d'air en repos, où la flamme ne s'incline ni d'un côté ni de l'autre. On peut encore échauffer fortement le milieu d'une feuille de tôle ; et l'on reconnaît les courants qui se dirigent vers le point échauffé, au moyen de la fumée qui se dégage de la mèche d'une bougie qu'on vient de souffler.

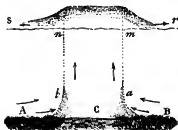


Fig. 842.

Quant aux circonstances qui modifient la température aux différents points de la surface de la terre, on peut en citer un grand nombre : la présence des eaux, l'état d'humidité du sol, sa nature, la végétation qui le recouvre, la hauteur au-dessus de la mer, la présence des nuages qui interceptent les rayons solaires dans certaines contrées..... On remarque qu'il suffit du passage d'un nuage au-dessus d'une plaine exposée au soleil pour qu'on ressente une agitation prononcée dans l'air.

Le vent peut être dû à une autre cause : quand une grande quantité de vapeur se résout en pluie, il se produit une grande diminution de pression, puisque l'eau occupe un volume 1680 fois plus petit que la vapeur qui la fournit (987). L'air des régions voisines se précipite donc pour combler ce vide, et il se produit un vent ordinairement violent.

1144. Modes de propagation du vent. — Il résulte des explications qui précèdent, que le vent se manifeste d'abord auprès de la colonne d'air échauffée, l'air voisin se précipitant le premier dans l'espace abandonné par la colonne ascendante ; en même temps cet air se raréfie, et cette raréfaction se communique de proche en proche, comme cela a lieu pour les ondes dilatantes du son (I, 492), de manière que le vent se propage en sens opposé à celui dans lequel il souffle. Les vents qui se propagent ainsi se nomment *vents d'aspiration*. On nomme *vents d'insufflation* ceux qui se propagent dans le sens même où ils soufflent. C'est Franklin qui, le premier, a signalé la propagation du vent par aspiration ; par exemple, il observa un vent de nord-est qui s'éleva à 7^h du soir à Philadelphie, et ce même vent ne commença à se faire

sentir qu'à 11ʰ du soir à Boston, qui est au nord-est de Philadelphie. L'abaissement du baromètre qui accompagne les vents violents est dû en partie à l'état de raréfaction de l'atmosphère.

L'existence des vents d'insufflation n'est pas moins prouvée que celle des vents d'aspiration. Nous citerons l'ouragan du 29 novembre 1836 qui passa sur Londres à 10ʰ du matin, à Amsterdam à 10ʰ et demie, à Hambourg à 6ʰ et enfin à Stettin à 9ʰ et demie du soir, se propageant ainsi dans le sens même où il soufflait. Quant à l'origine des vents d'insufflation, nous voyons que les vents de retour dans les régions supérieures de l'atmosphère sont de cette espèce. L'air refroidi sur les flancs des montagnes coule dans les vallées et produit aussi un vent d'insufflation. Il y a enfin des vents produits par la rencontre de deux courants marchant en sens contraire, et qui forment des tourbillons où l'air est entraîné avec violence dans un mouvement circulaire qui se propage dans le sens même où il exerce son impulsion.

II. Des vents réguliers.

1145. Les vents réguliers ne s'observent pendant toute l'année que dans la zone torride. Plus on s'approche des pôles, plus les vents sont irréguliers, à cause des changements plus fréquents et plus étendus de la température. Les vents réguliers se divisent en *vents périodiques* et *vents constants*. Les premiers sont principalement les *brises* et les *moussons*.

Brises de terre et brises de mer. — On désigne sous le nom de *brises*, des vents périodiques qui soufflent chaque jour sur les côtes. Vers 8 heures du matin, le vent commence à souffler de la mer jusqu'à 4 ou 5 heures du soir ; c'est la *brise de mer* ou *du matin* ; on en profite pour entrer dans le port. De 5 heures du soir au coucher du soleil, il y a un temps de repos après lequel le vent souffle vers la mer ; c'est la *brise de terre* ou *du soir*, qui dure jusqu'au lever du soleil ; on s'en sert pour sortir du port. Les brises ne se font sentir qu'à une petite distance des côtes ; elles s'observent principalement dans la zone torride, et ne sont sensibles que pendant l'été, dans les zones tempérées. Elles ont une direction généralement perpendiculaire à la côte ; mais cette direction, comme l'intensité, peut être modifiée par des vents accidentels concomitants.

Voici comment on explique les brises : vers 8 heures du matin, le sol commence à s'échauffer, tandis que les eaux de la mer conservent à peu près la même température (1115). Il s'établit donc au-dessus de la terre, une colonne d'air ascendante qui appelle l'air de la mer. Vers 3 ou 4 heures du soir, le sol se refroidit par rayonnement, l'air prend la même température sur terre que sur mer, et il reste en repos. Après le coucher du soleil, l'air qui recouvre la terre continue à se refroidir, et la colonne ascendante se formant sur les

eaux, appelle l'air de la côte. On voit que les brises doivent être très faibles par un temps couvert. Elles sont accompagnées d'un contre-courant dans les parties élevées de l'air, comme on l'a reconnu à la direction du mouvement des nuages. La brise du soir dure plus longtemps que la brise du matin, mais celle-ci est plus prononcée.

Brises des montagnes. — M. Fournet a étudié, dans les montagnes, des mouvements atmosphériques analogues aux brises de terre et de mer[1]. Ces mouvements sont surtout remarquables dans les vallées étroites, les défilés. Le soleil, à son lever, échauffe d'abord les sommités; de là, un appel d'air vers la montagne. Plus tard, le soleil pénètre au fond des vallées, qui s'échauffent plus facilement que les sommets élevés, et bientôt l'air le plus froid descend dans les parties basses. Ces vents de montagnes, qui ont reçu différents noms dans diverses localités, ont lieu à peu près aux mêmes heures que les brises de terre et de mer.

1146. Moussons. — On nomme ainsi des vents périodiques qui règnent principalement dans les mers resserrées ou formant de vastes golfes. Ces vents soufflent, pendant six mois dans un sens, et pendant les six autres en sens opposé. Ils s'expliquent de la même manière que les brises: à partir du mois d'avril, dans notre hémisphère, l'échauffement moyen de la terre est plus grand que celui de la mer; c'est l'époque de la *mousson de printemps* qui souffle vers la terre. La *mousson d'automne* commence en octobre; elle souffle vers la mer qui est alors plus échauffée que la terre. Dans l'hémisphère austral, où les saisons sont inverses, la mousson qui commence en avril souffle vers la côte, et celle qui commence en octobre souffle vers la mer. A l'époque où les moussons changent de direction, il y a, dans certaines mers, un temps de calme plus ou moins prolongé; d'autres fois, le changement se fait brusquement, et il est alors accompagné de coups de vent violents et de tempêtes.

C'est principalement dans la *mer des Indes* que l'on observe les moussons les mieux caractérisées. En hiver, la partie méridionale de l'Afrique est plus échauffée que les Indes; de même, la mer des Indes est plus échauffée que la mer d'Arabie, le golfe de Bengale et la mer de Chine; et l'on observe dans ces mers un courant du *nord-est* M (*fig.* 843) qui constitue la *mousson d'automne* et souffle du mois d'octobre au mois de février. Vers l'équinoxe vernal, ce vent cesse et est remplacé par des calmes ou des ouragans. A partir de cette époque le sol ainsi que la surface de la mer s'échauffent au nord de l'équateur, tandis qu'il y a refroidissement au sud, dans la partie méridionale de l'Afrique. On observe alors la *mousson de printemps* venant du *sud-ouest*, Me (*fig.* 843) et qui pénètre fort avant dans les terres, jusqu'à l'Himalaya et même jusqu'au Japon, ce que M. Dove explique par la diminution de pression qu'éprouve pendant l'été l'atmosphère de l'Asie, diminution qu'il a le premier signalée, en 1842. On observe d'autres moussons dans les bras de mer qui séparent les

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. LXXIV, p. 337.

nombreuses îles de l'Océanie, où leurs directions sont modifiées par la configuration du sol et des côtes. Ces moussons sont marquées sur la *fig.* 843 par une flèche à deux pointes; l'extrémité marquée *e* indique le sens du vent pendant la saison d'été.

Vents étésiens. — Il y a des moussons dans la Méditerranée : pendant l'été, le vent vient du nord, et pendant l'hiver, il vient du sud. Ces vents s'observent à Marseille et à Toulon, et se font sentir jusqu'en Grèce et en Italie; aussi étaient-ils connus des anciens, qui les désignaient sous le nom de *vents étésiens.* On les observe encore à Alger et en Egypte. Ces vents sont dus aux variations de température du sol aride de l'Afrique, principalement du désert de Sahara, qui s'échauffe très fortement pendant l'été et se refroidit rapidement pendant l'hiver, tandis que la mer et les côtes méridionales de l'Europe n'éprouvent que des changements de température peu prononcés.

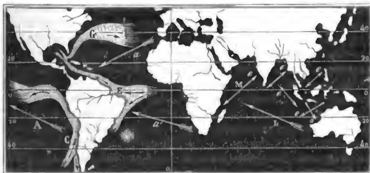


Fig. 843.

Les vents du nord sont, du reste, beaucoup plus forts que ceux du sud qui leur succèdent; aussi, la moyenne annuelle du temps employé par les navires à voiles pour aller d'Alger à Toulon dépasse-t-elle d'un quart la moyenne du temps employé pour revenir de Toulon à Alger.

1147. Vents alizés. — On nomme ainsi des vents qui soufflent constamment de l'est à l'ouest dans le voisinage de l'équateur. Ils furent observés pour la première fois par Christophe Colomb, et excitèrent l'épouvante de ses compagnons, qui craignaient de ne pouvoir revenir sur leurs pas. Descartes essayait de les expliquer par le mouvement de la terre qui laisserait en arrière l'air qui la recouvre. Halley les attribuait à l'action du soleil qui, échauffant l'air d'orient en occident, le poussait dans cette direction. Il est facile de voir en quoi pèchent ces deux systèmes. On doit à J. Hadley l'explication suivante, généralement adoptée.

Supposons d'abord que la surface de la terre soit partout identique ; l'atmosphère, entre les tropiques, sera plus échauffée que dans les zones tempérées,

l'air dilaté s'élèvera et sera remplacé par de l'air affluant des tropiques, d'où il résulterait des courants dirigés des pôles vers l'équateur, si la terre était en repos. Mais elle tourne sur elle-même, et ses différents points sont animés de vitesses d'autant plus petites qu'ils sont plus rapprochés des pôles ; lors donc que l'air des pôles s'avancera vers l'équateur, il se trouvera animé d'une vitesse, parallèle à l'équateur, plus petite que celle des points où il parviendra ; il restera donc en arriére, et il en résultera un courant d'air dirigé en sens inverse du mouvement de la terre, c'est-à-dire un vent du ***nord-est*** dans notre hémisphère, et du ***sud-est*** dans l'hémisphère austral. Ces courants se rencontrant sur l'équateur, se combineront pour former un vent dirigé de l'***est*** à l'***ouest***.

Il résulte de cette explication, qu'il doit y avoir dans les régions supérieures de l'atmosphère, des courants de retour dirigés de l'équateur vers les pôles et de l'***ouest*** à l'***est*** ; parce que l'air qui vient de l'équateur arrive sur les différents paralléles, avec des vitesses plus grandes que celles qu'ils possèdent. Cet air doit donc former, dans l'hémisphère nord, un vent de ***sud-ouest*** au-dessus de l'alizé du ***nord-est***, et dans l'hémisphère austral, un vent du ***nord-ouest*** au-dessus de l'alizé du ***sud-est***. Ces vents supérieurs transportent au loin les cendres lancées à une grande hauteur par certains volcans : par exemple, on a vu tomber à La Barbade les cendres du volcan de l'île de Saint-Vincent située à l'ouest ; en 1853, des cendres du volcan de Cassiguina, dans l'état de Guatimala, sont tombées à la Jamaïque, située à l'est, en telle abondance, que cette ville fut plongée dans une obscurité complète pendant plusieurs jours. Les voyageurs qui sont montés sur le pic de Ténériffe ont presque toujours trouvé le vent d'ouest au sommet pendant que le vent d'est régnait au pied de la montagne. Au printemps et à l'automne, on voit tomber à Lyon, à Malte, à Gênes, au Tyrol, une poussière fine que l'on croyait venir des plaines sablonneuses de l'Afrique. Mais M. Eremberg a reconnu, au moyen du microscope, que cette poussière est formée de parcelles organiques, d'infusoires desséchés, dont quelques-uns cependant conservent leurs ovaires frais. Cette poussière provient des vallées de l'Orénoque et de l'Amazone, qui, aux équinoxes de printemps et d'automne, sont desséchées, et exposées à des tourbillons de vent qui enlévent dans les régions supérieures de l'atmosphère les organismes pulvérulents qui jonchent le fond des marais desséchés, et les livrent au vent supérieur du sud-ouest, qui les transporte jusque sur l'ancien continent, dans l'espace de 30 à 40 jours. Ces vents supérieurs, que le mouvement des nuages fait aussi reconnaître, s'abaissent, aprés s'être refroidis et avoir diminué de vitesse, vers le 30e degré de latitude nord, et donnent naissance au vent du sud-ouest, dont les navigateurs profitent pour aller d'Amérique en Europe : un navire qui met 40 jours pour aller de Liverpool à New-York, n'en met que 23 pour revenir ; il est vrai qu'il est alors aidé par le ***courant du golfe***.

Les vents alizés ne présentent pas la régularité qui résulterait de la supposition que nous avons faite, que la surface de la terre est uniforme. La distribution des mers, le relief des continents, la direction des chaînes de

montagnes, les modifient notablement; aussi, ne les observe-t-on que dans les mers libres. Voici quelques détails à ce sujet.

Dans l'*Océan atlantique*, l'alizé du *nord-est a* (*fig.* 843) s'étend du 30e ou 28e degré de latitude nord au 8e degré. Là commence une région calme qui cesse à 3° de latitude nord, où commence l'alizé du *sud-est a'* pour s'arrêter à 28° de latitude sud. L'étendue de la bande calme dépend de la saison : au mois d'août, elle va de 3°,15 à 13° de latitude nord, et en février de 1°,15 à 6° seulement. On voit que l'alizé du sud-est dépasse la ligne. Suivant Prévost, l'excès de la température de l'hémisphère boréal sur celle de l'hémisphère austral serait la cause de ce résultat ; mais comme il ne se reproduit pas dans le Grand-Océan, cette explication ne peut convenir ; de plus, il en résulterait que l'alizé du sud-est devrait passer au sud de l'équateur pendant l'hiver de notre hémisphère, puisqu'alors il est plus froid que l'hémisphère austral; or, cela n'a pas lieu. De Humboldt explique la position septentrionale de la bande calme, par la configuration du bassin de l'Atlantique : pendant l'hiver, la mer est plus chaude que la terre vers le banc de Terre-Neuve, à cause du *Gulf-Stream*; ce qui tend à produire un vent du sud au nord qui, combiné avec le vent d'est, repousse le vent du nord-est vers le nord de l'équateur. De plus, l'Atlantique forme là une large bande dont la direction générale est du sud-est au nord-ouest, ce qui favorise la libre propagation du vent du sud-est et lui donne la prépondérance sur celui du nord-est.

Dans le *Grand-Océan*, l'alizé, A (*fig.* 843), commence à quelque distance de la côte occidentale de l'Amérique, à cause de l'immense relief de la chaîne des Andes, derrière laquelle se trouve une région de calme, fréquemment agitée par des coups de vents et des ouragans. A partir de cette région, le vent d'est se fait sentir jusqu'à la nouvelle Hollande et les îles Philippines ; il souffle du *nord-est* entre le 2e et le 25e degré de latitude boréale, et du *sud-est* entre le 10e et le 21e degré de latitude australe. On le retrouve dans l'Océan indien, L, où il porte le nom de *mousson du sud-est*, quoiqu'il règne pendant toute l'année.

Nous avons vu plus haut que le courant supérieur du sud-ouest s'abaisse vers le 30e degré. Nous ajouterons, d'après M. Maury et M. Ch. Dikens, que ce courant rencontre là un autre courant opposé venant du nord-est et qui concourt, en le choquant, à le faire descendre vers la terre. Il en résulte une région de calme, connue sous le nom de *bande calme du Cancer*, et dans laquelle le baromètre indique une élévation de pression, comme l'a constaté de Humboldt. Ce qu'il y a de remarquable, c'est que l'air qui vient du pôle et s'abaisse dans la bande calme, passe à travers cette bande et s'écoule vers l'équateur ; là, cet air rencontre un courant semblable, qui vient aussi d'une bande calme de l'hémisphère sud, et il s'élève par l'effet du choc et en même temps de la chaleur de la zone torride. La bande calme qui règne près de l'équateur, entre les alizés du nord-est et du sud-est, est la conséquence de ce conflit.

1148. Théorie des vents réguliers de M. Saigey. — M. Saigey a fait plusieurs objections à la théorie des vents alizés telle que nous venons de l'exposer : il fait remarquer d'abord que le vent d'est devrait être surtout sensible dans les zones tempérées, où la chaleur et la vitesse croissent beaucoup plus vite que dans le voisinage de l'équateur, quand on s'éloigne du pôle. Il montre ensuite que le décroissement de la température, à mesure qu'on s'élève, est, à l'équateur, six fois trop lent pour que les couches inférieures puissent s'élever notablement (1117). Cette dernière considération s'applique également aux brises et aux moussons. A la première objection, on peut répondre que l'air qui s'écoule par le haut vers les pôles, s'abaisse, après s'être refroidi, vers le 30e degré de latitude, pour retourner vers l'équateur en rasant la terre, comme l'observation le démontre ; de sorte que le circuit qu'il forme ne s'étend pas beaucoup au-delà du tropique, de même que les brises ne se font sentir qu'à une petite distance des côtes, le mouvement circulatoire de l'air qui les engendre étant limité à un espace restreint. De plus, l'ascension de la colonne d'air équatoriale ne doit pas être calculée seulement au moyen de la diminution de densité produite par la chaleur ; car, d'aprés ce que nous avons dit sur le choc des courants venant du nord et du sud, il y a encore un effet d'impulsion acquise, qui fait franchir à l'air échauffé la limite à laquelle il parviendrait en vertu du rapport seul des densités. Cette remarque s'applique aux brises et aux moussons, et nous pouvons comparer ce qui se passe au phénomène que produit l'eau quand elle rejaillit au-dessus de son niveau en avant des obstacles qui s'opposent à son cours, phénomène qui a donné l'idée du bélier hydraulique. Enfin, nous remarquerons, quant à ce qui concerne les vents alizés, que l'air de l'équateur est trés humide, ce qui lui donne une nouvelle force ascensionnelle, la vapeur d'eau étant moins dense que l'air.

Théorie nouvelle des brises et des moussons. — M. Saigey a donné une nouvelle explication de ces vents périodiques, basée sur les inégalités de niveau du sol. Considérons un plateau élevé ; la colonne d'air qui se trouve au-dessus de la plaine voisine, et que nous considérerons comme limitée au niveau du plateau, se dilatera quand elle s'échauffera ; sa limite supérieure dépassera donc le niveau du plateau, et l'air se répandra sur ce dernier. Quand il y aura refroidissement, au contraire, l'air coulera du plateau dans la plaine. En appliquant ce raisonnement aux côtes, et en regardant la terre ferme comme composée de plateaux successifs qui s'élèvent en gradins, on voit qu'au moment où la température augmentera, l'air devra affluer de la mer vers le premier gradin que représente le rivage, puis de celui-ci sur le second, et ainsi de suite. Quand le refroidissement surviendra, il y aura un mouvement d'air en sens contraire, et les deux mouvements inverses constitueront les brises de mer et de terre.

Il est incontestable que sur les continents, il doit y avoir des courants d'air occasionnés par ce mouvement en cascade. Mais on ne le comprend pas bien

sur la mer, tout prés du rivage, puisque la surface de l'eau n'éprouve que de faibles variations de température, et cependant c'est sur la mer que les brises sont surtout sensibles. M. Saigey regarde les moussons comme l'effet général de toutes les brises, et enfin les vents alizés comme « la résultante immédiate des moussons et la résultante générale de toutes les brises. »

III. Des vents irréguliers.

1149. Nous avons déjà dit que les vents irréguliers sont d'autant plus fréquents que la latitude est plus élevée. Entre les tropiques, les vents réguliers dominent et gênent la formation des autres ; de plus, la surface de la terre y est presque entiérement recouverte par la mer, ce qui est défavorable à la production des vents accidentels. Cependant on remarque des ouragans fréquents dans les régions calmes.



Fig. 844.

Système des vents en Europe. — En prenant la moyenne direction des vents pendant un grand nombre d'années, on peut connaitre quels sont ceux qui dominent dans une contrée. Dans la *fig.* 844 sont indiquées, d'après M. de Gasparin, les directions moyennes des vents dans l'Europe occidentale. On voit que les vents d'ouest dominent dans la partie septentrionale, ce que l'on doit attribuer à l'influence du courant de retour des vents alizés ; et que dans la partie méridionale, c'est le vent du nord qui domine, ce qui s'explique par l'appel énergique produit par l'échauffement des plaines sablonneuses de l'Afrique.

A Paris, de 1806 à 1826, les vents ont soufflé le nombre de fois suivant dans les différentes directions :

Nord.......	45	*Est*.......	23	*Sud*......	63	*Ouest*.......	70
Nord-est.....	40	*Sud-est*.....	23	*Sud-ouest*..	67	*Nord-ouest*....	34

Ce qui donne pour la direction moyenne, d'après la formule de Lambert (1142), $V = 56°,17$. L'angle V est fait avec la méridienne, dans l'espace compris entre le sud et l'ouest, parce que le numérateur du rapport qui sert à calculer sa tangente se trouve négatif.

Influence des saisons. — On conçoit que le sol étant plus chaud que la surface de la mer pendant l'été, et moins chaud pendant l'hiver, les vents de mer doivent dominer pendant l'été et les vents de terre pendant la saison froide. C'est en effet ce qui a lieu : Franklin avait observé une alternance semblable en Amérique ; en Europe, les vents viennent de l'ouest, surtout pendant l'été.

Nous remarquerons enfin que l'heure de la journée a une influence marquée sur la direction moyenne du vent. Sur les côtes et dans les montagnes, les brises interviennent évidemment dans le résultat. Mais la configuration du sol, l'état de sa surface, la direction des vallées, le voisinage des eaux..., exercent un influence trop variable pour qu'il soit possible de rien énoncer de général sur ce sujet. Il faudra donc étudier à ce point de vue chaque localité en particulier, pour en pouvoir définir complétement le climat particulier.

On conçoit combien la connaissance de la marche des vents réguliers et celle des vents dominants, ont d'importance pour la navigation et la climatologie. Mais on a été longtemps avant de soupçonner qu'il pouvait y avoir quelque chose de constant dans ces mouvements atmosphériques. Aujourd'hui qu'on a reconnu que l'ensemble des vents est soumis à une marche générale régulière, et que la formule *inconstant comme le vent* ne peut s'appliquer qu'aux cas les moins fréquents, on s'attache à étudier avec soin les directions des vents, sur mer et sur les continents. Nous avons déjà signalé la carte de l'air de M. Maury; M. Lartigue, de son côté, a publié en 1840, sous le titre d'*Exposition du système des vents*, un grand travail sur ce sujet, accompagné d'une carte hydrographique. Il part des deux courants polaires et des vents alizés comme base, et il les désigne sous le nom de *vents primitifs*; il s'occupe ensuite des vents variables sous les diverses latitudes et en étudie les mouvements généraux et les différentes phases.

1150. Loi de rotation du vent. — Au-delà des tropiques, les vents sont souvent produits par le conflit de plusieurs courants, principalement du vent du *nord-est*, que nous avons signalé dans les régions polaires (1148), et de celui du *sud-est*, qui vient de l'équateur. Il résulte de cette rencontre, des *vents circulaires* ou *tourbillons*, étudiés par M. Dove, dès 1827 [1], et qui semblent se succéder dans un ordre déterminé, avec le déplacement annuel de la limite de séparation des deux vents. Ces tourbillons, produits par la rencontre du courant polaire et du courant équatorial, se déplacent en général, et dans le sens du mouvement apparent du soleil, et tournent, dans l'hémisphère boréal, dans le sens nord, est, sud, ouest, et en sens opposé dans l'autre hémisphère. C'est là ce qui constitue la *loi de rotation* de M. Dove. La girouette, qui se place toujours perpendiculairement au rayon de tourbillon, tourne donc aussi peu à peu, de 180° au plus, dans un temps qui dépend de sa vitesse de translation, et qui peut varier, de 24^h à plusieurs mois. Pour reconnaître cette

[1] *Recherches météorologiques*, 1837; et *Annales de chimie et de phys.*, 3e s., t. I, p. 242.

loi, il faut un grand nombre d'observations, à cause des nombreuses causes de perturbations qui peuvent la déguiser, comme les vents périodiques, les ouragans, les tourbillons accidentels produits par le conflit de vents occasionnés par la configuration du sol.

La loi de rotation de M. Dove peut être établie, soit au moyen de preuves indirectes déduites des observations du baromètre et du thermomètre, soit au moyen des anémomètres enregistreurs. On a fait un grand nombre d'observations pour la contrôler. A Liverpool, M. Hartnap a trouvé pour la moyenne de quatre années, de 1852 à 1855, 25,5 rotations complètes *directes*, c'est-à-dire conformes à la loi, et 9 *rétrogrades*. A Greenwich, l'excès moyen des rotations directes a été 13,5, de 1842 à 1854. L'année 1853 a présenté une anomalie, car il y a eu une ou deux rotations rétrogrades de plus que de rotations directes; mais cette année a présenté aussi d'énormes irrégularités dans la marche des températures. M. Quételet a trouvé à Bruxelles, de 1842 à 1846, pour les excès annuels moyens, 0,8 en hiver, 4,8 au printemps, 7 en été et 1 en automne. A Kharkov, M. Lespshine a trouvé, pour l'excès moyen annuel, le nombre 15. Des observations faites à Bombay, de 1848 à 1851, ont encore confirmé la loi....

1151. Des caractères physiques des vents. — Indépendamment de la vitesse et de la direction des vents, il y a à considérer leurs propriétés particulières : ils peuvent être froids ou chauds, secs ou humides, chargés de certaines poussières, etc.

Température. — La température du vent dépend de la région d'où il vient et des contrées qu'il a traversées. En général, les vents du sud et de mer sont chauds et humides, les vents du nord et de terre sont froids et secs. Quand le vent parcourt un pays humide, il active l'évaporation et se refroidit. Les saisons ont une grande influence sur la température du vent venant d'une direction donnée, parce qu'elles modifient l'état de la surface du sol. Par exemple, en France, le vent du *sud-est* est sec et plus chaud que le vent du *sud*, en été, parce qu'il traverse les plateaux arides de la Bourgogne, qui s'échauffent fortement; en hiver, il est au contraire plus froid que le vent du sud, ces mêmes plateaux étant alors couverts de neige.

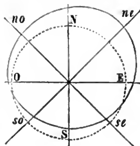


Fig. 845.

Dans la partie occidentale de l'Europe, la température des différents vents va en croissant quand, en partant du *nord-est*, qui est dans la direction du pôle du froid, on fait le tour de la rose en passant d'abord par le nord. Or, nous avons vu (I, 393) que ces vents affectent le baromètre de manière qu'il baisse quand, en partant du nord-est, on parcourt la rose dans le sens que nous venons d'indiquer. On peut donc dire que les vents chauds font baisser le baromètre, et que les vents froids le font monter. La *fig.* 845, qui

représente la *rose barométrique* des vents, peut donc aussi en représenter la *rose thermométrique*, si l'on a soin de renverser les résultats en considérant les points de la courbe les plus éloignés du centre comme correspondant aux températures les plus basses, et réciproquement.

La loi des températures qui correspondent aux différents vents souffre des exceptions locales. Par exemple, le vent du sud, connu sous le nom de *mistral* dans la vallée du Rhône, est très froid, à cause de son passage dans le voisinage des Alpes couvertes de neige. En Provence, les vents d'est, qui ont traversé les mêmes montagnes, sont froids, tandis que dans la Lombardie ce sont les vents d'ouest qui sont dans ce cas.

Voici les températures des différents vents à 3 heures du soir, à Paris, pendant les différentes saisons :

	N	N.E	E	S.E	S	S.O	O	N.O
Hiver....	3°,6	1°,2	2°,5	5°,7	8°,3	10°,8	8°.8	6°,0
Printemps.........	13,7	14,9	17,8	26,6	20,3	18,2	16,8	14,6
Eté................	27,2	28,1	30,0	32,8	29,5	26,6	26,0	25,8
Automne......... ..	14,8	14,3	16,1	19,1	19,4	15,6	16,8	15,7
Année entière......	15,2	14.7	23,1	19,1	19.3	18,6	17,0	15,5

1152. Ouragans et tornados. — Les ouragans sont des coups de vent qui s'élèvent brusquement et embrassent un espace circonscrit, dans lequel le mouvement de l'air n'a pas une direction unique ; ils sont accompagnés de pluie, et souvent de grêle et de tonnerre. Quand le météore occupe un espace peu étendu, on le nomme *tornado*. Ces phénomènes, signalés d'abord par Brandes, ont été l'objet d'une étude spéciale de la part de M. Espy[1]. Il a constaté d'abord, par la direction des arbres renversés au même instant, que le mouvement de l'air dans le tornado va de son contour vers une région centrale, circulaire ou allongée, suivant la forme qu'il présente lui-même. Au milieu existe un courant ascendant d'air chaud extrêmement rapide. Le baromètre s'y tient très bas, quelquefois de 60^{mm} plus bas que vers les bords du météore : la colonne ascendante tend à se refroidir en s'élevant ; mais comme elle laisse condenser l'humidité qu'elle contient, ce qui produit un nuage épais, il y a dégagement de chaleur latente. Il résulte des calculs approximatifs de M. Espy, que cette chaleur dégagée fait plus que compenser la perte provenant de l'expansion de l'air, de sorte que la colonne reste toujours plus chaude que l'air environnant, et qu'elle possède une force ascensionnelle d'autant plus grande qu'elle est plus élevée. Le nuage qui se forme à une certaine hauteur s'élève prodigieusement et s'étend ensuite dans tous les sens en donnant de la

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, Rapport de M. Babinet, t. I, p. 372.

pluie et de la grêle. Il résulte de ce déversement de l'air tout autour du tornado, que, en dehors de ses limites, le baromètre se tient de 2 à 12mm, suivant l'étendue du météore, au-dessus de la hauteur normale. Cette dernière hauteur s'observe sur les limites mêmes du météore.

Les ouragans et les tornados se transportent avec une assez grande lenteur, et M. Espy a reconnu qu'ils suivent la direction du vent régnant dans les régions supérieures de l'air. Au moyen du télégraphe électrique, on peut annoncer leur arrivée, de manière qu'on a le temps de prendre des mesures de précaution.

Voici comment M. Espy explique ces redoutables météores : l'air qui recouvre une contrée plane, étendue, très humide, et dans laquelle il règne un grand calme, s'échauffe et s'élève verticalement à une grande hauteur, en conservant une température toujours supérieure à l'air environnant, à cause de la condensation de son humidité ; sa force ascensionnelle va donc en s'accroissant, et il se produit un véritable tirage qui appelle violemment l'air inférieur. Pour montrer l'effet calorifique résultant de la condensation de la vapeur, M. Espy raréfie rapidement l'air dans un vase, qu'il nomme *néphéloscope*, et fait voir que le refroidissement, malgré l'influence des parois du vase, est bien plus prononcé quand l'air est sec que lorsqu'il est humide et laisse condenser sa vapeur.

L'abaissement du baromètre, qui précède la formation des ouragans et leur sert de pronostic, et la naissance subite d'un orage dans un air calme, se rattachent facilement à la théorie qui précède. M. Espy explique aussi les trombes en les regardant comme des tornados de très petites dimensions ; mais comme l'électricité joue ici un rôle important, nous y reviendrons en parlant des météores électriques.

Les ouragans et les tornados se montrent principalement entre les tropiques : dans la Chine et les mers voisines, dans la partie sud-ouest de l'Océan indien, les Indes occidentales, le sud-ouest de l'Afrique, la mer des Antilles..... La violence du vent est quelquefois prodigieuse : on a vu, à la Guadeloupe, des édifices solidement construits être rasés jusqu'aux fondations ; des débris emportés par le vent traverser des portes épaisses ; des pièces de bois s'enfoncer d'un mètre dans une route garnie d'une couche de pierres durcie par un long usage.

1153. Vents chauds des déserts. — Dans les déserts de l'Afrique, de l'Arabie, de la Perse..., il s'élève parfois des vents secs et brûlants qui soulèvent le sable et l'emportent à de grandes distances. Ces vents ont reçu différents noms, *simoun*, *chamsin*, *harmattan*..., suivant les localités. Ils font baisser le baromètre ; ils dessèchent les plantes, et produisent sur les hommes et les animaux des effets qui s'expliquent par leur haute température et leur état de sécheresse extrême. La respiration est haletante, le gosier enflammé, la soif ardente ; les lèvres, les yeux deviennent secs et douloureux ; l'évaporation est fortement activée, et il en résulte sur la peau une irritation suivie souvent

de gerçures. Les habitants de certains pays s'enduisent de graisse ou de boue pour se préserver de ces derniers effets.

Le *simoum*, *samum* ou *sémum* (de l'arabe *samum*, qui veut dire vénéneux et chaud), souffle du sud, dans le désert de Sahara. Il s'élève au moment de la plus grande chaleur du jour. Le sol sablonneux est fortement échauffé, et l'air souléve la poussière, même quand il règne encore un calme complet, comme l'a observé M. Pottinger. On aperçoit du côté du sud une tache sombre qui grandit peu à peu; l'atmosphéro semble embrasée, et prend une teinte rougeâtre due au sable soulevé; le soleil, voilé par cette espéce de brouillard, ne produit plus d'ombres. Le vent déplace le sable comme les flots de la mer, en formant des collines ayant jusqu'à 7 métres de hauteur, et dont il modifie à chaque instant la forme. Bien des caravanes, depuis Cambyse[1], ont été englouties dans ces sables mouvants. Les voyageurs surpris par le *simoun* s'enveloppent la tête pour échapper à l'action de la poussiére. Cette poussiére peut être transportée à travers la Méditerranée jusqu'en Espagne, en Sicile et même en Italie, où le vent qui l'apporte est connu sous le nom de *sirocco*. Cependant M. Kaemtz fait naître le sirocco sur les rochers arides de la Sicile, et le *solano* d'Espagne dans les plaines de l'Andalousie.

L'*harmattan* souffle dans la Guinée, en décembre, janvier et février; il est dirigé vers la mer et généralement peu intense. Il transporte un sable fin et blanc, tellement épais quelquefois, qu'il cache le soleil; et le thermométre peut monter jusqu'à 40° au soleil, et jusqu'à 29° à l'ombre. Ce vent est tellement sec que le bois des portes, des meubles, se déforme au point de se briser.

Le *chamzin* est propre à l'Egypte; il souffle à l'époque de l'équinoxe de printemps, et dure 50 jours, comme l'indique son nom.

Il existe des vents chauds, ayant beaucoup d'analogie avec ceux des déserts, dans des plaines couvertes de végétation, comme dans l'Inde, le Chili, la Louisiane, les Llanos de l'Orénoque. On n'a pas encore expliqué d'une manière satisfaisante la formation de ces vents chauds, ni de ceux des plaines arides. M. Babinet a émis l'opinion qu'ils proviennent de masses d'air, chassées des régions supérieures de l'atmosphère dans les couches inférieures. Cet air trés sec se desséche encore en s'échauffant par la compression qu'il éprouve à mesure qu'il s'abaisse. M. Babinet cite comme exemple d'un pareil abaissement, une masse d'air qui, descendue des montagnes de Candie vers les plaines de Famagouste, dans l'île de Chypre, dessécha et fit périr tous les végétaux qui se trouvèrent sur son passage. Reste à trouver les causes qui peuvent, dans certains pays, lancer ainsi l'air des régions supérieures de l'atmosphère, vers la surface de la terre. Quelques physiciens penchent à donner à cet étrange phénoméne une origine électrique.

1 Aliquando Cambyses ad Ammonem misit exercitum: quem arena Austro mota, et more nivis incidens, texit, deindè obruit (Senec., *Quest. nat.*, lib. II, cap. 30).

§ 3. — HYDROMÉTÉORES, OU MÉTÉORES AQUEUX.

I. Hygrométrie.

1154. On désigne sous le nom d'*hydrométéores* ou de *météores aqueux* les phénomènes atmosphériques dus à la vapeur d'eau que contient l'atmosphère, comme la rosée, la pluie, la neige.... La partie de la science dans laquelle on se propose d'étudier, et principalement d'évaluer la quantité d'humidité répandue dans l'air, se désigne sous le nom d'*hygrométrie*. Nous allons d'abord nous occuper de cette branche de la physique.

1155. De l'humidité de l'air et de ses effets. — Il y a toujours de la vapeur d'eau dans l'air. Pour le prouver, il suffit d'y placer un vase rempli de glace ou d'un mélange réfrigérant : on voit, au bout de quelques instants, des gouttelettes d'eau, ou une mince couche de glace, provenant de la vapeur que contient l'air, se déposer sur les parois extérieures du vase.

L'humidité de l'air a une grande influence sur les êtres vivants, végétaux et animaux ; sans elle, ils périraient bientôt. Quand l'air est très humide, au contraire, il est meilleur conducteur de la chaleur ; si sa température est basse il refroidit rapidement le corps des hommes et des animaux, et s'il est très chaud, il leur cède beaucoup de chaleur, dont l'effet n'est pas atténué par l'évaporation cutanée. Aussi les pays humides, froids et surtout chauds, comme la partie méridionale de l'Asie, l'île de Zanzibar, sont-ils très dangereux à habiter.

Les substances organiques privées de vie éprouvent aussi les effets de l'humidité : le bois, l'ivoire, la corne, les poils des animaux, la soie, les fibres textiles des végétaux...., s'allongent par l'humidité. Les cordes, composées de filaments tordus de nature organique, qui se gonflent par l'humidité, augmentent de diamètre et se raccourcissent, mais de manière que, la diminution de longueur étant moins prononcée que l'augmentation en largeur, le volume est augmenté. En même temps, l'humidité diminue la torsion, les fibres gonflées faisant effort sur les spires pour les écarter. La toile, composée de fils tors entrecroisés, se retrécit par l'humidité, tandis que le papier s'étend, parce qu'il est formé de filaments mêlés dans toutes les directions, et qui n'ont pas subi de torsion.

Il y a des substances inorganiques qui absorbent l'humidité de l'air ; telles sont la potasse, la soude, la chaux et un certain nombre de sels. Quand un sel condense assez d'humidité pour paraître mouillé, on dit qu'il est *déliquescent*. Le sel marin est déliquescent quand l'air est notablement humide ; il se dessèche au contraire, quand l'air ne contient que peu de vapeur. Ces effets sont dus à

l'affinité chimique de la substance pour l'eau. L'acide sulfurique, l'acide phosphorique absorbent fortement l'humidité de l'air et sont souvent employés pour le dessécher. Les gaz qui fument à l'air, comme l'acide chlorhydrique, ont tous une grande affinité pour l'eau, et précipitent à l'état liquide celle que contient l'atmosphère. L'acide fluoborique est tellement avide d'eau, qu'il suffit d'une bulle de ce gaz pour reconnaître les plus petites traces d'humidité, à la fumée qui se produit instantanément.

D'autres substances précipitent l'humidité à leur surface, par un effet de cohésion; le verre est surtout dans ce cas, et un ballon de verre change de poids quand l'état d'humidité de l'air varie. Beaucoup de substances réduites en poudre fine dessèchent l'air, à cause de la grande étendue de la surface qu'elles présentent. On appelle *hygrométriques*, les substances qui absorbent l'humidité de l'air. Ainsi, les substances organiques, le verre, sont hygrométriques; les métaux ne le sont pas.

Applications. — L'augmentation de volume des substances organiques par l'humidité, se fait avec une grande énergie. Pour détacher des blocs de pierre, dans les carrières, on creuse un sillon assez profond, dans lequel on enfonce des coins en bois, que l'on humecte ensuite; le bois se gonfle avec tant de force que le bloc se sépare. On emploie ce procédé dans l'exploitation des pierres meulières. Le raccourcissement des cordes par l'humidité sert aussi à soulever des masses énormes; il suffit de tendre fortement une corde attachée d'une part à la masse, et d'autre part à un obstacle fixe, puis de mouiller la corde. Cette méthode a été appliquée à Venise vers l'an 1200 pour dresser les deux colonnes de granit de la place Saint-Marc. 400 ans après, on en a encore fait usage pour l'érection de l'obélisque de Sixte-Quint, à Rome; ce n'est qu'après que l'appareil eut été préparé et reconnu insuffisant qu'on s'avisa de mouiller les cordes. C'est l'humidité qui, en gonflant le bois, ferme hermétiquement les joints des barriques pleines. Elle peut aussi, en déplaçant les molécules, détruire l'effet de la compression sur certaines substances organiques, de même que la chaleur détruit l'écrouissage des métaux. Par exemple, on imprime en creux par compression, dans une pièce de bois, les détails d'un bas-relief en métal très dur, puis on enlève au rabot tout ce qui dépasse le fond de l'empreinte, et l'on expose la pièce à l'action d'un air chaud et humide; on voit alors les parties refoulées se relever en bosse proportionnellement au degré de compression qu'elles avaient subie.

1156. De l'état hygrométrique. — L'*état d'humidité* ou l'*état hygrométrique* ne dépend pas de la quantité absolue de vapeur contenue dans un certain volume d'air, mais de la distance à laquelle cet air se trouve de l'état de saturation. Or, nous avons vu qu'il faut d'autant plus de vapeur pour saturer l'air, que sa température est plus élevée. L'air peut donc être très humide avec peu de vapeur s'il est froid, et très sec avec une plus grande quantité de vapeur s'il est chaud. Quand un poêle échauffe rapidement l'air d'une chambre, cet air s'éloigne du point de saturation, quoique la quantité de vapeur qu'il renferme

reste la même. C'est pourquoi on met sur le poêle un vase plein d'eau, destiné à fournir de la vapeur à l'air, qui, sans cette précaution, serait trop sec et pourrait incommoder.

On définit l'*état hygrométrique* de l'air, le rapport entre la quantité de vapeur qu'il contient et celle qu'il contiendrait s'il était saturé à la même température. Ordinairement on se sert de la force élastique de la vapeur pour représenter les deux termes de ce rapport. On a imaginé une foule de méthodes pour apprécier l'état hygrométrique; les instruments qui servent à cet usage portent le nom d'*hygromètres*. La plupart ne méritent que le nom d'*hygroscopes*; car ils ne donnent pas l'état hygrométrique, et montrent seulement dans deux observations successives, si l'humidité a augmenté ou diminué.

1157. Hygroscopes divers. — Le premier qui ait essayé d'apprécier l'état d'humidité de l'air paraît être le cardinal Cusa, au XVe siècle. Il pesait un flocon de laine, dont le poids augmentait avec le degré d'humidité. Lana employa plus tard, au lieu de laine, du salpêtre calciné, et Kirker un épi de blé. Les académiciens de Florence recueillaient l'eau condensée par un vase conique rempli de glace. Fontana pesait un plateau de verre à 0°, sec, puis chargé de l'humidité qu'il avait attirée. Plus tard on s'est servi de l'allongement des substances organiques. Boyle considérait les longueurs successives d'une corde chargée d'un poids. Goald l'enroulait par son extrémité inférieure autour d'une poulie portant une aiguille, comme dans l'hygromètre à cheveu décrit plus loin. Don Casbois remplaçait la corde, par des boyaux de ver à soie ajustés les uns au bout des autres. On a aussi employé des bandes de bois perpendiculaires aux fibres, dont on rendait l'allongement très apparent, par divers artifices. Mersenne jugeait de l'état d'humidité par le son que rendait une corde tendue : plus le son était aigu, plus l'air était humide.

Deluc a imaginé un hygroscope fait comme un thermomètre à mercure, seulement le réservoir est en ivoire, et s'étend par l'humidité. Chiminello formait ce réservoir d'un tuyau de plume, et D. Wilson, d'une vessie de rat. Ces instruments sont évidemment influencés par les variations de température.

On a imaginé beaucoup d'*hygroscopes par torsion* : une corde à boyau, fixée par l'une de ses extrémités, porte à l'autre une aiguille, qui tourne par l'humidité dans le sens qui correspond à une diminution de torsion. On remplace quelquefois la corde à boyau par un de ces filets aigus que porte l'enveloppe de l'avoine. On a donné aux hygroscopes par torsion une foule de formes différentes. Leupold suspend à une corde à boyau verticale, un plateau de bois dont une moitié se trouve dans l'intérieur d'une maisonnette en carton, ayant deux portes; aux extrémités d'un même diamètre se trouvent deux petites figures : l'une sort quand l'air est humide, et l'autre rentre; c'est le contraire quand l'air est sec. La *fig.* 846 représente une disposition devenue populaire. Un personnage découpé dans une tablette en bois porte un capuchon *n* formé d'un morceau de papier replié comme on le voit en *n'*, et fixé à l'extrémité d'une corde à boyau, dont l'autre bout tient en *c* à un tube porté par la tablette *a*.

Ce tube est percé de trous pour que l'air puisse y circuler. Quand il y a beaucoup d'humidité, la corde à boyau en se détordant ramène le capuchon sur la tête du personnage. Les hygroscopes de torsion sont principalement destinés à pronostiquer les changements de temps; quand l'air est très humide, il est probable qu'il pleuvra, et quand il est sec, on peut s'attendre au beau temps. Il existe d'autres espèces d'hygroscopes; presque tous se ramènent à l'un de ceux que nous venons de citer; leur grand nombre atteste les longs tâtonnements des physiciens pour obtenir un instrument commode et exact.

Nous allons maintenant nous occuper des méthodes qui donnent l'*état hygrométrique*. Ces méthodes peuvent se rapporter à quatre principales: 1° méthodes par absorption de la vapeur par des substances chimiques; 2° méthodes dans lesquelles on emploie des substances organiques; 3° méthodes par l'évaluation de la température à laquelle se dépose la vapeur atmosphérique; 4° méthode par le refroidissement qu'éprouve un thermomètre mouillé.



Fig. 846.

1158. Méthode chimique. — Cette méthode est rigoureuse et peut servir à contrôler les autres. La marche que l'on suit a été imaginée par M. Brunner; voici comment M. Regnault opère[1]. L'air dont on veut déterminer l'état hygrométrique est aspiré avec une vitesse uniforme dans un vase aspirateur V, dans lequel il arrive par le tube *t* et le robinet *r*. Le vase aspirateur a été jaugé avec soin par des pesées, à une température connue. Avant d'arriver en *r*, l'air traverse les tubes A et B remplis de ponce sulfurique, où il dépose toute son humidité. Un troisième tube C est destiné à arrêter l'humidité qui pourrait venir du vase aspirateur. Les tubes A, B doivent être placés tout près de l'orifice d'entrée de l'air; un thermomètre très sensible, que l'on consulte de loin, de 5 minutes en 5 minutes, est suspendu au point où l'on puise l'air.

Quand le vase aspirateur est plein d'air, on sépare les tubes A et B, et on les pèse; l'excès de leur poids actuel sur celui qu'ils avaient avant l'expérience fait connaître le poids de la vapeur que contient un volume d'air égal à la capacité de l'aspirateur. Les tubes A, B, ont de petites dimensions, afin d'éviter les incertitudes des pesées provenant de l'humidité qui peut se déposer sur le verre, et de la perte de poids dans l'air. M. Regnault s'est assuré qu'ils arrêtent toute l'humidité de l'air qui les traverse, car le poids du tube B n'augmente que de 1 à 2 milligrammes. En outre, ayant fait passer dans des tubes en U remplis d'éponges mouillées, de l'air sec qui traversait ensuite les tubes A et B, il reconnut que le poids du tube A avait augmenté de la quantité

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XV, p. 130 et 163.

même dont avait diminué le poids des tubes à éponges. Le tube B n'avait rien gagné.

Quand on connaît le poids P de la vapeur contenue dans un volume d'air, il faut en déduire la force élastique f de cette vapeur, pour la diviser ensuite par la tension maximum à la même température, et en conclure l'état hygrométrique. La force f se calcule en égalant au poids P l'expression

$$V(1+kt')\,\frac{H-f'}{H-f}\cdot\frac{1}{1+\alpha t'}\cdot p\delta\,\frac{f}{760}.$$

trouvée ci-dessus (986).

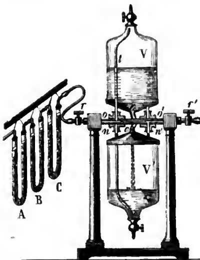


Fig. 847.

Aspirateur double. — Pour faire passer un grand volume d'air dans les tubes A, B, C, au moyen d'un appareil aspirateur de capacité restreinte, on emploie l'aspirateur double imaginé par M. Brunner, et représenté dans la *fig.* 847, tel qu'il a été perfectionné par M. Boisgiraud. Deux vases de même capacité V, V', en verre ou en métal, communiquant par le canal *cc*, peuvent basculer autour de l'arbre fixe *oo*, en tournant avec les manchons *n*, *n'* ajustés à frottement doux sur cet arbre. Dans la position de la figure, l'eau tombe, du vase V dans le vase V', et l'air est aspiré dans le vase V, par le tube *t*, qui communique, avec le robinet *r*, par le canal *or* pratiqué dans l'arbre fixe. L'air du vase V' s'échappe en même temps par le canal *o'r'* et le robinet *r'*. Quand le vase V' est vide, et le vase V plein, on ferme un robinet que porte le tube *cc*, et l'on retourne l'appareil de manière à mettre les vases à la place l'un de l'autre; ouvrant ensuite le robinet du canal *cc*, l'aspiration se fait dans le vase supérieur, et l'air du vase inférieur s'échappe en *r'*.

1159. HYGROMÈTRES PAR ABSORPTION. — La méthode chimique fait connaître l'état hygrométrique avec une grande exactitude, mais elle ne donne que l'état moyen de l'air pendant la durée de l'expérience, et, comme elle exige une manipulation longue et minutieuse, elle ne peut être employée comme méthode usuelle. On a donc cherché à construire des hygromètres capables de donner l'état d'humidité de l'air par une simple lecture. L'hygromètre à cheveu est un des plus employé; nous allons examiner quel degré d'exactitude il comporte.

Hygromètre à cheveu. — Cet instrument, connu sous le nom d'*hygromètre de Saussure* (*fig.* 848), se compose d'un cadre métallique dont on

néglige les dilatations, à la partie supérieure duquel est attaché un cheveu cc' qui s'enroule par son extrémité inférieure autour d'une poulie très mobile. A l'axe de cette poulie est fixée, par son centre de gravité, une aiguille dont l'extrémité parcourt un arc divisé. Un petit poids *p* attaché à un cordon, tient le cheveu toujours tendu. *l* est une pince qui sert à soutenir ce poids et à fixer la poulie quand on transporte l'instrument, et *v* une vis destinée à donner au point d'attache *c* du cheveu, la position convenable. Quand l'humidité augmente, le cheveu s'allonge et l'aiguille monte. Le contraire a lieu quand l'air se dessèche.

Le cheveu doit être fin, doux au toucher et coupé sur une tête vivante et saine. Cependant, on a fait des hygromètres qui marchaient bien, avec des cheveux pris sur des momies égyptiennes. Le cheveu doit être dégraissé ; Saussure le faisait bouillir dans un petit sac en toile plongé dans de l'eau contenant 10 grammes de carbonate de soude par litre, puis il le plongeait dans l'eau bouillante pure, et enfin le lavait dans de l'eau fraîche. M. Regnault préfère laisser séjourner les cheveux, pendant 24 heures, dans l'éther.



Fig. 848.



Fig. 849.

Pour graduer l'hygromètre à cheveu, on détermine deux points fixes, qui sont celui de *la saturation* et celui de *la sécheresse extrême*. Pour marquer le premier de ces points, on place l'instrument sous une cloche mouillée reposant sur l'eau, et l'on note le point où s'arrête l'aiguille. Pour le point de sécheresse absolue, on place l'hygromètre sous une cloche sèche dans laquelle il y a du chlorure de calcium ou de la chaux vive. M. Regnault préfère introduire l'instrument dans une éprouvette à pied, au fond de laquelle il y a de l'acide sulfurique concentré, et dont il ferme l'ouverture au moyen d'une plaque de verre rodée et enduite de suif; la dessiccation est plus prompte et plus complète. On divise ensuite l'intervalle entre les points fixes en 100 parties égales, qui sont les degrés de l'hygromètre ; on met le zéro au point de sécheresse absolue.

M. Babinet a donné à l'hygromètre à cheveu une forme différente : le cheveu est suspendu verticalement à une vis micrométrique *v* (*fig.* 849), et tendu par un petit poids. Un nœud *o* est visé au moyen d'une lunette fixe à réticule *l*. En amenant constamment le nœud *o* au centre du réticule, on reconnait, au moyen de la vis micrométrique, les variations de longueur que le cheveu a éprouvées, en partant de la longueur qu'il possède quand il est desséché.

Deluc a aussi imaginé un hygromètre analogue à celui de Saussure; seulement

le cheveu était remplacé par un mince ruban de fanon de baleine, pris perpendiculairement aux fibres. Deluc marquait le point d'humidité extrême en plongeant l'instrument dans l'eau, ce qui n'est pas exact.

1160. Tables hygrométriques. — L'hygromètre à cheveu donne toujours les mêmes indications quand l'état hygrométrique est le même, quelle que soit la température. La dilatation du cheveu par la chaleur est négligeable, d'autant plus que son effet est contrebalancé par celui de la dilatation du cadre métallique, si bien que 33° de température ne font varier l'hygromètre que d'une fraction de ses degrés. Mais ces degrés ne sont pas comparables entre eux, c'est-à-dire que les différents états d'humidité de l'air ne sont pas proportionnels aux nombres de degrés indiqués par l'instrument. Par exemple, l'état hygrométrique étant 0,1 ; 0,5; 0,9 et 1, l'instrument marque 20°, 72°, 95°, 100°. On a donc cherché à construire des tables indiquant l'état hygrométrique correspondant à un nombre de degrés donné.

Saussure employait un ballon muni d'un thermomètre et d'un baromètre, dans lequel il suspendait, à côté de l'hygromètre, un morceau de toile mouillée dont il évaluait la perte de poids. Il connaissait par ce moyen les poids de vapeur correspondant aux positions de l'aiguille sur le cadran. Ce procédé est peu exact, à cause de la vapeur qui se dépose sur le verre.

Méthode de Dulong. — L'hygromètre est renfermé dans un vase où l'on fait circuler un mélange d'air sec et d'hydrogène saturé d'humidité. Les deux gaz arrivent avec des vitesses constantes dans un seul tube où ils se mélangent avant de se rendre dans le vase. Quand l'air contenu dans ce vase a été entièrement remplacé par le mélange, on observe le nombre de degrés qu'indique l'hygromètre. Si l'on appelle h et a les volumes d'air et d'hydrogène contenus dans un volume $h+a$ du mélange, h représentera aussi le volume qu'occupe la vapeur à saturation dans l'hydrogène, et $h+a$ celui qu'elle occupe dans le mélange. Si nous représentons par d la densité de la vapeur dans l'hydrogène, cette densité sera $d\dfrac{h}{a+h}$ dans le volume $a+h$, et l'état hygrométrique sera $\dfrac{h}{a+h}$; car les masses de vapeur contenues dans un même volume sont entre elles comme les densités. En faisant varier la vitesse relative d'écoulement des gaz, on aura différents états hygrométriques, et l'on pourra calculer une table.

Pour obtenir les quantités h et a, on recueille sur l'eau une partie V du mélange, et l'on en fait l'analyse chimique par la méthode de l'*eudiomètre*. On détermine ainsi le volume H d'hydrogène que contient le volume V. Le volume d'air A est alors égal à V — H ; mais ce volume est saturé d'humidité dans l'eudiomètre, tandis qu'il est sec dans le mélange : il y a donc une correction à faire. Soit P la pression du gaz dans l'eudiomètre, et f la force élastique maximum de la vapeur à la température de l'expérience ; $P-f$ sera

la pression de l'air seul, et $(V-H)\frac{P-f}{P}$, son volume à l'état sec. On aura alors $h : a = H : (V-H)\frac{P-f}{P}$, d'où l'on tirera le rapport $h : (a+h)$.

Méthode de Gay-Lussac. — Le travail de Dulong était fort avancé, quand Gay-Lussac annonça les résultats qu'il avait obtenus par une autre méthode plus simple, mais moins expéditive. Cette méthode est fondée sur ce principe, que la tension maximum de la vapeur produite par une dissolution saline est d'autant plus petite que cette dissolution contient plus de sel; la tendance du liquide à s'évaporer étant contrebalancée par son affinité pour le sel, en même temps que par la pression de la vapeur formée. L'hygromètre est suspendu au couvercle d'un vase de verre au fond duquel se trouve une couche de la dissolution saline. Ce couvercle est luté avec soin. Quand l'aiguille est stationnaire, on note la division à laquelle elle correspond. En même temps une petite partie de la dissolution est introduite dans le vide d'un baromètre à la même température que le vase, et l'on mesure la tension de sa vapeur. On divise ensuite cette tension par la tension maximum donnée par l'eau pure à la même température, et l'on obtient ainsi l'état hygrométrique correspondant au nombre de degrés indiqué. En opérant successivement avec des dissolutions diversement concentrées, Gay-Lussac a obtenu 10 termes de la table cherchée. M. Biot a trouvé les termes intermédiaires, par interpolation. En construisant la courbe des résultats donnés par l'expérience, il a reconnu que cette courbe est une branche d'hyperbole dont la concavité est tournée vers l'axe des x, sur lequel sont comptées les tensions, et dont l'axe transverse coupe les axes des coordonnées à des distances égales de l'origine, en passant par le point qui correspond à $x = 100$ [1].

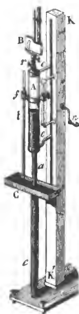


Fig. 850.

Méthode de Melloni. — Le principe de cette méthode consiste à placer l'hygromètre dans un espace B (*fig.* 850) privé d'air et saturé de vapeur, dont on fait ensuite varier le volume, afin de diminuer la tension de la vapeur [2]. A*a* est un long tube barométrique très large dans sa moitié supérieure A, et fermé en *r* par une virole en fer munie d'un robinet. Au robinet *r* est ajustée une boite en métal B hermétiquement fermée, dans laquelle est renfermé l'hygromètre. Une bande de verre permet de distinguer l'arc divisé. Afin de diminuer la capacité de la boite, on ne conserve du cadre de l'hygromètre que le côté qui

[1] *Traité de physique*, par M. J.-B. Biot, t. II, p. 199.

[2] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. XLIII, p. 39.

soutient le cheveu. Le tube A*a* est installé dans une cuvette très profonde C*c*, et fixé par les barres *o*, *o* à une crémaillère pouvant glisser dans un support vertical KK′ ; de manière qu'on peut enfoncer ce tube plus ou moins dans la cuvette, en faisant tourner, au moyen de la manivelle *n*, un pignon denté qui agit sur la crémaillère. On commence par faire le vide dans la boîte B, après avoir déposé quelques gouttes d'eau sur le cadran divisé. En laissant rentrer l'air et faisant le vide plusieurs fois, on parvient à faire disparaître les gouttes d'eau, et à obtenir l'espace saturé de vapeur et privé totalement d'air. On visse ensuite la boîte, au robinet *r*, après avoir rempli le tube A*a* de mercure [1] et l'avoir enfoncé de manière que ce liquide le remplisse entièrement ; puis on ouvre le robinet *r*. La différence entre le niveau du mercure dans le tube A*a*, et dans un baromètre *t* placé à côté dans la même cuvette, donne la force élastique de la vapeur dans la boîte qui contient l'hygromètre. La différence de niveau s'observe au moyen d'un double anneau *f* enveloppant les deux tubes, et porté par une petite règle verticale, le long de laquelle on le fait glisser au moyen d'un pignon denté. La règle est fixée à la colonne KK′. En élevant plus ou moins le tube A*a*, on fait varier la tension de la vapeur, et en consultant en même temps l'hygromètre, on obtient assez rapidement les éléments d'une table.

Ayant représenté par une courbe les résultats de sa table, Melloni a trouvé une hyperbole un peu moins courbe que celle de M. Biot ; et comme il opérait à 33°, il en conclut que les nombres de degrés de l'hygromètre sont plus près d'être proportionnels aux quantités d'humidité, quand la température est plus élevée.

1161. Expériences de M. Regnault [2]. — Il se présente ici une question importante : une table construite avec un hygromètre à cheveu convient-elle à tous les autres ? Pour qu'il en soit ainsi, il faudrait que tous ces instruments fussent toujours d'accord dans leurs indications. M. Regnault a comparé, à ce point de vue, un grand nombre d'hygromètres, et il a reconnu que, si les instruments construits avec des cheveux identiques dégraissés dans la même

[1] Pour remplir le tube A*a* de mercure sec et privé d'air, Melloni fermait avec un bouchon son extrémité inférieure, enlevait la virole à robinet *r*, et versait du mercure par un entonnoir effilé assez long pour pénétrer dans la partie étroite *a*. Quand le tube était plein, il mastiquait la virole *r*, la remplissait de mercure et fermait le robinet. Il amenait ensuite l'extrémité inférieure du tube *a* dans la partie C de la cuvette, et ôtait le bouchon. Le mercure descendait alors dans le gros tube. Pour enlever l'air et l'humidité, on vissait en *r* un ballon vide et on ouvrait le robinet *r*, après avoir abaissé le tube A*a* de manière que le mercure le remplît. Le peu d'air condensé à la partie supérieure se répandait dans le ballon. Relevant de nouveau le tube A*a*, l'enfonçant et le mettant en communication avec le ballon vide et desséché, on finissait, après avoir répété plusieurs fois ces diverses opérations, par obtenir en A un vide aussi parfait que celui d'un bon baromètre.

[2] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XV, p. 164.

opération, sont sensiblement d'accord, il n'en est plus de même, le plus souvent, quand ils sont construits avec des cheveux différents ou préparés différemment. Les indications peuvent différer de 5°. Des cheveux identiques, mais tendus par des poids différents, ne s'allongent pas non plus de la même manière. Il faut donc construire une table pour chaque instrument; et pour un même instrument, quand on en change le cheveu. C'est pourquoi nous ne donnons pas ici de table hygrométrique.

M. Regnault a cherché à simplifier la construction de ces tables; voici les deux méthodes qu'il indique.

La première est fondée sur le même principe que celle de Gay-Lussac. M. Regnault a d'abord préparé des mélanges d'acide sulfurique contenant 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 12, 18 parties d'eau, pour une d'acide anhydre; puis il a construit des tables donnant les tensions des vapeurs de ces différentes solutions, entre 0° et 50°, en employant le procédé du n° 971 (*fig.* 707), et au moyen de la formule d'interpolation $f = a_2 + a_1 b^t$, dont il a déterminé les trois constantes, pour chaque dissolution.



Fig. 851.

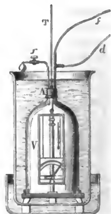


Fig. 852.

Cela fait, pour graduer l'hygromètre, M. Regnault marque d'abord le point d'humidité extrême. Il rejette le point de sécheresse extrême, comme inutile, et comme mettant le cheveu hors de son état normal; car, au bout de 3 mois, l'aiguille marche encore, quand l'hygromètre est renfermé auprès d'acide sulfurique concentré. L'instrument est ensuite placé dans un vase cylindrique en verre (*fig.* 851), dont l'ouverture supérieure se ferme exactement avec un plan de verre, et dans lequel on met successivement les diverses dissolutions d'acide sulfurique. Le vide est fait dans l'appareil par le tube à robinet adapté au couvercle, et l'hygromètre atteint rapidement son état stationnaire, en marquant le même nombre de degrés que dans l'air.

La seconde méthode permet d'opérer à différentes températures. On suspend un ou plusieurs hygromètres sous une cloche V (*fig.* 852), que l'on fixe ensuite au moyen d'un mastic très fusible, dans une rainure ménagée dans un socle en fonte. La cloche porte une monture A qui laisse passer la tige d'un thermomètre T, et à laquelle est adapté un tube à deux branches *f*, *d*, dont l'une, *d*, communique avec un manomètre barométrique, et l'autre, *f*, avec une machine pneumatique. Un troisième tube à robinet *r* est mastiqué à un petit ballon contenant de l'eau. La cloche est plongée dans un vase en verre rempli d'eau

qu'on agite continuellement ; le fond de ce vase est lui-même plongé dans l'eau d'une chaudière en fonte qu'on peut chauffer avec une lampe à alcool. Après avoir fait le vide sous la cloche pendant que le robinet r est ouvert, on ferme ce robinet, puis on fait plusieurs fois le vide en laissant à chaque fois rentrer lentement de l'air bien sec. Quand on a fait une dernière fois le vide le plus exactement possible, on mesure, au catéthomètre, la différence de hauteur des deux colonnes de mercure du manomètre barométrique, ce qui donne la force élastique e de l'air sec resté sous la cloche. On ouvre ensuite un instant le robinet r, de la vapeur passe dans la cloche en plus ou moins grande quantité, et l'on observe l'indication de l'hygromètre et les niveaux du manomètre barométrique. La différence de niveau, diminuée de la pression e de l'air sec restant, donne la force élastique de la vapeur introduite. En laissant le robinet r ouvert plus ou moins longtemps, on fait varier l'état d'humidité de la cloche, et l'on peut construire une table assez rapidement. Cette méthode permet aussi de vérifier de temps en temps les hygromètres, et de voir si le cheveu n'a pas subi quelque altération.

Malgré ces perfectionnements, l'hygromètre à cheveu est tellement sujet à se déranger, que M. Regnault conseille de renoncer à son usage.

1162. Hygromètres a condensation. — Le Roy a imaginé de déterminer l'état hygrométrique de l'air, en cherchant à quelle température il faut le refroidir pour que la vapeur qu'il contient suffise pour le saturer. On prend un gobelet en argent poli contenant de l'eau dans laquelle est plongé un thermomètre; on refroidit peu à peu cette eau en y jetant de petits morceaux de glace. Le gobelet refroidit par son contact la couche d'air enveloppante, et au bout d'un certain temps, il se dépose un léger brouillard qui vient ternir la surface de l'argent. Le thermomètre fait connaître la température du vase au moment où ce phénomène se produit. Comme cette température est évidemment un peu trop basse, puisqu'il y a condensation de vapeur, on attend que le dépôt disparaisse, et l'on observe encore le thermomètre. La moyenne, θ, des deux températures ainsi obtenues, est prise pour le *point de rosée*, c'est-à-dire pour la température à laquelle l'air doit être abaissé pour se trouver saturé au moyen de la quantité de vapeur qu'il contient. Si f est la tension maximum de la vapeur à la température θ, et f' la tension maximum à la température ambiante, $f : f'$ sera l'état hygrométrique.

Hygromètre de Daniell. — Daniell a imaginé, pour appliquer cette méthode, un instrument très ingénieux dans lequel le froid est produit par l'évaporation de l'éther. Un tube deux fois recourbé (*fig.* 853) est terminé par deux boules : l'une, B, est à moitié remplie d'éther dont un petit thermomètre donne la température. Avant de fermer la pointe effilée qui termine l'autre boule m, on a chassé tout l'air de l'appareil au moyen de la vapeur d'éther, puis on a enveloppé cette boule d'une fine batiste. Pour se servir de cet instrument, on projette des gouttes d'éther sur la boule m au moyen d'un petit flacon f, auquel on a adapté un bouchon foré L'éther, divisé par la batiste, s'évapore

rapidement et refroidit la boule *m* ; la vapeur qui remplit le tube se condense alors dans cette boule, et l'éther de la boule B distillant peu à peu, cette boule se refroidit, et amène bientôt l'air qui la touche au point de rosée, dont la température est donnée par le thermomètre intérieur.

Pour rendre le point de rosée plus facile à saisir, la boule B est ordinairement en verre bleu ; quelquefois elle est garnie d'une bande dorée.

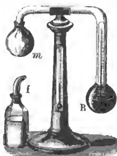


Fig. 853.

L'hygromètre de Daniell présente divers inconvénients : 1° la température qui correspond au point de rosée n'existe qu'à la surface de l'éther dans la boule B ; le thermomètre, dont le réservoir s'enfonce dans le liquide, doit donc donner une température trop élevée ; 2° la présence de l'opérateur modifie l'état hygrométrique et la température de l'air ; 3° l'éther du commerce contient toujours de l'eau, dont la vapeur modifie aussi l'état hygrométrique ; 4° enfin, l'instrument ne fonctionne plus quand l'air est très sec, et la température élevée. M. A. Connell évite ce dernier inconvénient, en provoquant l'évaporation de l'éther en faisant le vide au moyen d'une petite pompe pneumatique, dans un vase en laiton poli, qui la contient, et dans lequel se trouve le thermomètre.

Hygromètres à capsule et à virole. — M. Pouillet a décrit sous ces dénominations, des instruments dans lesquels l'évaporation de l'éther refroidit immédiatement un thermomètre. Le premier consiste en un thermomètre renversé dont le réservoir est entouré d'un vase peu profond en plaqué d'or très mince rempli d'éther, et sur lequel on observe le point de rosé. L'autre est un thermomètre horizontal, dont le réservoir allongé porte en son milieu une virole d'or ; de chaque côté, ce réservoir est recouvert de batiste sur laquelle on verse de l'éther. Ces instruments sont sujets aux mêmes inconvénients que l'hygromètre de Daniell.

Hygromètre de M. Belli. — Un tube en fer de forme hexagonale, dont trois faces sont bien polies, est rempli de mercure, et son extrémité s'enfonce dans un vase garni de plaques de liége, dans lequel on met de la glace ou un mélange réfrigérant. Dans le tube de fer plonge un thermomètre fixé aux extrémités supérieures de deux règles qui descendent de chaque côté du tube et le pressent de manière à rester à la hauteur où on les place ; leur extrémité inférieure est de niveau avec le réservoir du thermomètre. Le froid se propageant dans le tube de fer, la vapeur se condense jusqu'à une certaine hauteur. On amène le réservoir du thermomètre à la limite du dépôt, et il donne alors la température du point de rosée. On peut ainsi observer à loisir, sans avoir besoin de guetter le moment où la vapeur se précipite. Avec 1 kil. de glace, l'appareil peut servir pendant toute une journée. Comme on peut l'observer de

loin, il échappe à la plupart des inconvénients de l'hygromètre de Daniell; mais la température indiquée par le thermomètre ne peut être exactement celle de la section du tube de fer, dans laquelle se trouve son réservoir.

Hygromètre de Savary. — Pour être sûr de la température exacte du point de rosée, Savary a eu l'idée de faire déposer la vapeur, sur les spires d'un thermomètre métallique de Breguet (843), enveloppé d'un cylindre de platine mince qu'il refroidissait par l'évaporation de l'éther.

Hygromètre de tension de M. Majocchi. — Avec cet appareil, on évalue la tension de la vapeur que contient l'air, en mesurant ce qu'il en manque pour qu'il y ait saturation. Il est disposé d'une manière analogue au tube de Gay-Lussac servant à démontrer la loi du mélange des vapeurs avec les gaz (946). Après avoir rempli l'appareil de mercure sec, on y fait entrer de l'air et l'on mesure la force élastique. On introduit ensuite quelques gouttes d'eau; et la pression augmente, de la tension de la vapeur qui manquait à l'air pour être saturé. Cette méthode est peu exacte, parce que le verre condense une partie de la vapeur de l'air qu'on introduit.

M. Regnault avait, de son côté, cherché à appliquer le même principe. Pour éviter la cause d'erreur que nous venons d'indiquer, il faisait passer un courant d'air dans un ballon, et ce n'était qu'après qu'il s'était mis en équilibre hygroscopique avec l'air extérieur, qu'il observait la pression dans le tube de Gay-Lussac, avec lequel ce ballon communiquait. Il introduisait ensuite quelques gouttes d'eau pour saturer l'espace. Le seul inconvénient de cette méthode, ainsi pratiquée, consiste dans la lenteur avec laquelle l'état de saturation s'établit, la température pouvant changer pendant l'opération.

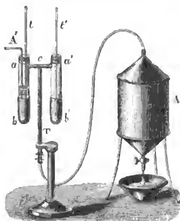


Fig. 854.

1163. Hygromètre condenseur de M. Regnault. — Cet instrument, exempt des inconvénients des autres hygromètres à condensation, constitue l'hygromètre le plus précis, et répond complètement aux besoins de la science. Il est représenté dans la *fig.* 854 : *ab* est un gros tube de verre, ouvert par les deux bouts, et ajusté à sa partie inférieure à un dé en argent mince et poli *b*, ayant 20^{mm} de diamètre et 44^{mm} de hauteur. L'ouverture supérieure du tube est fermée par un bouchon soutenant un thermomètre *t*, et laissant passer un tube A' qui s'enfonce jusqu'au fond du dé d'argent. La partie supérieure du tube *ab* est mise en communication avec l'aspirateur A par la tubulure *c* et le tuyau en cuivre cT, auquel est adapté un tube en caoutchouc. *a'b'* est un tube

semblable à *ab*, mais ne contenant pas d'éther, complétement fermé et muni d'un thermomètre *t'*.

Pour mesurer l'état hygrométrique, on fait écouler l'eau de l'aspirateur; l'air pénétre par le tube A' à travers l'éther, et le refroidit en emportant de la vapeur. Bientôt la rosée se dépose en *b*, à un instant d'autant plus facile à saisir, que l'on a le dé *b'* pour terme de comparaison. On arrête ensuite l'écoulement de l'aspirateur, et l'on observe la température à laquelle la rosée disparait. On connaît ainsi les limites de température entre lesquelles se trouve compris le point de rosée. On répète alors l'expérience en faisant écouler l'eau plus lentement, et l'on obtient des limites plus rapprochées. On peut ainsi, en 3 ou 4 minutes, déterminer le point de rosée à $\frac{1}{20}$ de degré prés.

On voit que la vapeur d'éther ne se répand pas dans l'air, et que l'observateur qui dirige l'aspirateur peut être trés éloigné du tube *ab*, qu'il observe avec une lunette. L'agitation que les bulles d'air produisent dans l'éther y rend la température uniforme. Le pouvoir refroidissant du courant d'air est tel qu'on arrive toujours au point de rosée; on peut, même par les plus grandes chaleurs de l'été, faire congeler la rosée sur le dé d'argent.

Dans les voyages on peut supprimer le vase aspirateur. On fait alors passer l'air, en soufflant avec la bouche par un long tube flexible plongeant dans l'éther, et muni d'un robinet qui permet de régler la vitesse du courant. L'air sort par un tube assez long pour que les vapeurs d'éther ne puissent pas modifier l'état hygrométrique autour de l'appareil. Enfin, on peut remplacer l'éther par l'alcool, ce qui est important dans les pays chauds, où le premier liquide est difficile à conserver; il faut alors augmenter la vitesse du courant d'air.

1164. HYGROMÈTRES PAR ÉVAPORATION. — Leslie a cherché à déterminer l'état d'humidité de l'air par une méthode, dont la première idée parait due à Hutton, et qui consiste à observer la rapidité de l'évaporation de l'eau, rapidité déduite elle-même de l'abaissement de température qu'elle produit. L'appareil employé par Leslie n'était autre chose que son thermomètre différentiel, dont l'une des boules était garnie d'une fine toile constamment mouillée [1]. Gay-Lussac s'est aussi occupé du même sujet. M. August, de Berlin, a publié plusieurs Mémoires sur cette méthode, et a donné le nom de *psychromètre* à l'instrument qu'il a adopté.

Psychromètre d'August. — Cet instrument consiste en deux thermomètres très sensibles *t*, *t'* (*fig.* 855), dont un, *t'*, a sa boule enveloppée de batiste continuellement humectée au moyen d'un faisceau de fils, qui plonge dans le réservoir *v'*. *v* est un tube, fermé à sa partie supérieure, destiné à maintenir un niveau constant dans ce réservoir. Le thermomètre mouillé finit par devenir stationnaire, parce qu'il rayonne moins et que l'évaporation

[1] *Annales de chimie*, 1re série, t. XXXV, p. 3.

diminue, à mesure que sa température s'abaisse, pendant que l'air, qui se renouvelle continuellement à sa surface, lui fournit de la chaleur. On observe les températures des deux thermomètres, et c'est de ces températures qu'il faut conclure l'état hygrométrique.

Comme l'abaissement de température du thermomètre mouillé doit être observé avec une grande précision, et qu'il ne dépasse pas 12 ou 15° en Europe, M. Walferdin a proposé d'opérer de la manière suivante, au moyen de son thermomètre métastatique à alcool (706) : on fait tourner cet instrument, comme une fronde, après avoir introduit l'index de mercure dans le tube, et l'on a la température de l'air. On enveloppe ensuite la boule, d'une fine toile que l'on mouille, et l'on fait tourner de nouveau jusqu'à ce que la température cesse de s'abaisser. La nouvelle position de l'index, comparée à la première, fait connaître la différence cherchée. On peut se dispenser d'envelopper la boule ; pour cela, on la dépolit et on la surmonte d'un rebord qui entoure le tube à son origine, et dans lequel on verse un peu d'eau.



Fig. 855.

Cette manière d'opérer suppose que le refroidissement du thermomètre mouillé est indépendant du mouvement de l'air, ce qu'on a cru d'abord, et ce qu'on expliquait en admettant que la chaleur cédée par l'air sans cesse renouvelé, compensait l'effet d'une plus rapide évaporation.

Formule du psychromètre. — On a admis d'abord que le refroidissement du thermomètre mouillé, indépendant du mouvement de l'air, était proportionnel à la différence entre la tension f de la vapeur à saturation et la tension x telle qu'elle existe dans l'air. En désignant par t et t' les températures des deux thermomètres, et par t'' celle que prendrait le thermomètre mouillé dans l'air sec à la température t, on aurait donc

$$f : f-x = t-t'' : t-t' ; \qquad \text{d'où} \qquad \frac{x}{f} = \frac{t'-t''}{t-t''},$$

pour l'état hygrométrique cherché. Pour calculer cette valeur, il suffit de connaître, indépendamment des quantités f, t, t', l'abaissement $t-t''$ d'un thermomètre mouillé dans l'air sec. Gay-Lussac a construit une table qui donne cet abaissement pour des températures ambiantes allant de 0° à 25°. Il opérait en faisant passer un courant d'air sec dans un tube, où ce courant rencontrait d'abord un thermomètre sec qui donnait sa température, puis un thermomètre recouvert d'une éponge mouillée, qui indiquait le maximum d'abaissement produit. Nous citerons comme exemple les nombres suivants : quand la température de l'air était 0°, 5°, 10°, 15°, 20° et 25°, l'abaissement trouvé était de 5°,82 ; 7°,27 ; 8°,97 ; 10°,82 ; 12°,73 ; 14°,70.

M. August a proposé une autre formule qui dispense de connaître $t - t'$. Il suppose toujours que l'agitation de l'air n'a pas d'influence, et que les couches d'air qui arrivent successivement au contact de la boule humide, en prennent la température et se saturent d'humidité. Dans la formule à laquelle il parvient, entrent deux constantes qui dépendent de la chaleur spécifique de l'air, et de la densité, de la chaleur latente et de la chaleur spécifique de la vapeur d'eau. Si l'on met à la place des valeurs adoptées par M. August, les valeurs plus exactes obtenues par M. Regnault, la formule devient

$$x = f' - \frac{0,429\,(t - t')}{610 - t'}\,h.$$

f' représente la tension maximum, à la température t' de la boule mouillée, t la température ambiante, et h la hauteur du baromètre.

1165. De l'exactitude du psychromètre. — L'hygromètre condenseur, exigeant une petite manipulation, un instrument exact qui n'exigerait qu'une simple lecture serait préférable; c'est pourquoi M. Regnault a soumis à un contrôle attentif la marche du psychromètre[1]. Il a d'abord cherché si l'agitation de l'air est réellement sans influence sur les indications du thermomètre mouillé. De l'air desséché arrive en *o* (*fig.* 856) dans un tube en laiton, recourbé plusieurs fois, passe dans deux boîtes à parois très minces, dans lesquelles sont un thermomètre sec t, et un thermomètre t' enveloppé de mousseline et continuellement humecté au moyen d'une mèche de coton qui vient d'un petit réservoir *c*. Le tout est plongé dans de l'eau à la température ambiante et continuellement agitée. L'air est aspiré, par le tube *a*, dans un grand vase aspirateur, avec une vitesse connue.

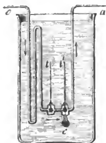


Fig. 856.

M. Regnault a reconnu par ce moyen que la vitesse d'un courant d'air sec a une influence marquée sur le thermomètre mouillé. Par exemple, à la température de 14°,90, pour des vitesses entre elles comme 1, 3, 6, les différences des deux thermomètres ont été de 7°,38 ; 13°,03; 10°,63. Des vitesses plus considérables, obtenues en aspirant l'air au moyen de la machine pneumatique, ont donné, quand la température de l'air était de 18°,91 et de 22°,95, les valeurs $t' = 5°,39$ et $t' = 7°,35$ pour la température du thermomètre mouillé, tandis que la formule d'August donne $t' = 5°,91$ et $t' = 8°$.

Quand l'air aspiré est humide, l'augmentation de vitesse fait encore baisser le thermomètre mouillé, mais l'effet est moins prononcé qu'avec l'air sec. On

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XV, p. 201; et t. XXXVII, p. 259.

peut vérifier ce résultat en attachant un psychromètre à une roue horizontale que l'on fait tourner ; on voit aussitôt le thermomètre mouillé baisser de plusieurs dixièmes de degré.

M. Regnault a ensuite contrôlé les indications du psychromètre par la méthode chimique (1158) et il est arrivé aux conclusions qui suivent : 1° la forme des réservoirs des thermomètres n'a pas d'influence sensible ; il en est de même de la manière de mouiller, pourvu que la batiste soit entièrement mouillée et qu'il n'y ait pas un trop grand excès d'eau ; 2° à l'air libre, et sous des températures comprises entre 7° et 18°, les états hygrométriques donnés par la formule sont constamment trop forts, mais de 2 à 3 centièmes seulement. Pour des températures plus basses et quand l'air est très humide, l'erreur est plus grande : ainsi, entre 0° et 7°, elle peut s'élever à 0,1 ; 3° dans un espace fermé à des températures de 8° à 25°, elle peut atteindre 0,1. Cela tient à ce que l'air étant en repos, la valeur de t' se trouve trop élevée ; et, en effet, quand on ouvre deux fenêtres opposées, de manière à produire un courant d'air, l'erreur s'atténue ; 4° quand la vitesse d'un courant d'air ne dépasse pas 8^m, elle n'a pas d'influence sur les indications de l'instrument ; car deux appareils semblables, dont l'un était dans l'air en repos, et l'autre à l'origine d'un gros tuyau par lequel l'air se rendait dans un ventilateur à force centrifuge, ont toujours été sensiblement d'accord, tant que la vitesse n'a pas dépassé 8^m. Cette vitesse était mesurée au moyen d'un anémomètre de rotation (1139).

5° Il semble résulter d'expériences faites par M. Marié, à Saint-Etienne et sur le mont Pila, sous des pressions de 705^{mm} et de 655^{mm}, et par M. Isarn dans les Pyrénées, que la formule d'August donne aussi sous les faibles pressions, des résultats sensiblement d'accord avec ceux de l'hygromètre condenseur.

On peut conclure de tout ce qui précède que la formule d'August conduit à des résultats un peu trop forts, mais néanmoins suffisamment approchés dans la plupart des cas.

M. Regnault a simplifié cette formule en négligeant certains termes trop petits pour influencer les résultats, et il l'a présentée sous la forme

$$x = f' - \frac{a(t-t')}{b} h, \qquad \text{ou} \qquad x = f' - A(t-t')h.$$

Puis il a cherché, en opérant dans un grand nombre de circonstances différentes, quel nombre il faudrait mettre à la place de la constante A pour que les valeurs de x fussent d'accord avec celles que donne la méthode chimique. Il a reconnu ainsi qu'il faut donner à A des valeurs différentes, suivant les circonstances dans lesquelles se trouve l'instrument. Par exemple, dans une chambre fermée, il faut faire A égal à 0,00128, et dans une cour entourée de constructions élevées, à 0,00074, ce qui doit être attribué au rayonnement différent des corps environnants. Quand la température est au-dessous de 0°, une seule valeur de A ne peut plus représenter les fractions de saturation dans tous les

états d'humidité, pour un même appareil restant dans la même situation; il faut au moins deux valeurs différentes.

Pour faire usage du psychromètre dans un observatoire, il faudra commencer par déterminer la constante A qui convient à l'appareil et au lieu où il est installé. Le psychromètre est donc un instrument *empirique*, comme l'hygromètre à cheveu, et il ne peut être employé qu'avec une foule de précautions. Dans tous les cas, il sera toujours préférable de se servir de l'*hygromètre condenseur*, qui ne laisse rien à désirer sous le rapport de la sûreté et de la précision. En y appliquant l'aspirateur double à retournement (1158), on évitera la peine de remplir souvent l'aspirateur.

1166. Observations hygrométriques. — Les méthodes hygrométriques étant restées longtemps très imparfaites, nous ne possédons qu'un petit nombre d'observations sur l'humidité de l'atmosphère, qui cependant a une grande influence sur les climats.

On peut dire, en général, que la *quantité absolue* de vapeur croît avec la température. Elle augmente donc quand on se rapproche de l'équateur. Elle est aussi plus grande sur mer que sur les côtes, et sur les côtes que dans l'intérieur des continents, où l'on trouve souvent d'immenses espaces desséchés, comme les déserts de l'Afrique et de l'Asie, les steppes de la Sibérie, les plaines de l'Orénoque, l'intérieur de la Nouvelle-Hollande d'où soufflent des vents très secs.

Dans nos climats, l'air est rarement saturé. Par les plus grandes pluies, l'hygromètre à cheveu ne dépasse guère 95°. Ce n'est que par certains brouillards ou dans les temps de dégel, qu'il peut marquer 100°. La moyenne est de 72°, ce qui suppose que l'air contient environ la moitié de la vapeur nécessaire à sa saturation; et la limite inférieure, de 40°, ce qui correspond à un état hygrométrique égal environ à $\frac{1}{4}$.

Variations diurnes. — M. Neuber, à Apenrade, en Danemark, a observé pendant un an, de 7ʰ du matin à 11ʰ du soir, l'hygromètre de Daniell toutes les deux heures. M. Kupfer, à Pétersbourg, se servait du psychromètre; mais la plus longue série que nous possédions a été recueillie à Halle par M. Kaemtz, à partir de 1831 [1]. Il résulte des observations faites pendant les 12 premières années, que la *quantité absolue* de vapeur est minimum un peu avant le lever du soleil, et va ensuite en croissant à mesure que la chaleur active l'évaporation. L'*état hygrométrique*, au contraire, est au maximum au lever du soleil, à cause de la basse température, et va en diminuant ensuite, malgré la production de nouvelles vapeurs, à cause de l'échauffement de l'atmosphère. En hiver, la quantité absolue de vapeur augmente jusqu'au moment où le thermomètre commence à baisser; il y a ensuite précipitation de vapeur et augmentation de l'état hygrométrique. En été, la quantité absolue d'humidité atteint son maximum avant midi, puis elle diminue en même temps que l'état hygromé-

[1] Kaemtz, *Leçons de météorologie*, traduction française, p. 91.

trique, ce que l'on peut attribuer aux courants ascendants, qui emportent les vapeurs dans les régions supérieures. Le minimum a lieu au moment de la plus grande chaleur, puis l'état hygrométrique augmente assez régulièrement jusqu'au lendemain matin. Sur les bords de la mer, les résultats semblent être les mêmes, seulement le minimum du matin est moins prononcé. A Apenrade, le maximum et le minimum diffèrent plus qu'à Halle.

Variations mensuelles. — A Halle, l'état hygrométrique est maximum en janvier et minimum en juillet; mais les quantités absolues de vapeur suivent une marche inverse. Cette marche paraît être la même dans tous les pays où l'on a observé, même dans l'Inde, d'après M. Prinsep. On conçoit que les vents régnants compliquent singulièrement ces résultats, car les uns apportent l'humidité, et d'autres la sécheresse; leurs effets dépendent aussi des saisons. La *fig.* 857 donne une idée de l'état hygrométrique qui correspond aux différents vents dans les diverses saisons, à Halle. Les ordonnées représentent les états hygrométriques à l'échelle de $\frac{1}{2}$ millimètre par unité, en représentant par 100 l'état de saturation, et en retranchant 60 unités, c'est-à-dire 30mm à chaque ordonnée. *pp* est la courbe du printemps, *ee* celle de l'été, *aa* celle de l'automne, et *hh* celle de l'hiver.

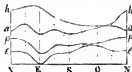


Fig. 857.

Influence de la hauteur. — On peut dire, en général, que *par le beau temps* l'état hygrométrique diminue à mesure qu'on s'élève dans l'atmosphère. Saussure et Deluc ont, les premiers, constaté ce résultat. Saussure n'a jamais vu l'hygromètre au-dessus de 40°, dans les Alpes. De Humboldt a aussi remarqué la sécheresse extrême de l'atmosphère sur les montagnes d'Amérique. Gay-Lussac, à 7000m de hauteur, a vu l'hygromètre à 26° seulement, ce qui correspond à un état hygrométrique égal à $\frac{1}{6}$, et à une quantité absolue de vapeur extrêmement petite, car la température était de —10°. Quand le ciel est chargé de nuages, cette loi souffre des exceptions faciles à concevoir.

Atmidomètre. — Le vent ayant beaucoup d'influence sur l'état hygrométrique, en emportant la vapeur qui se forme, on cherche à se rendre compte de l'état de sécheresse ou d'humidité d'un climat par la rapidité avec laquelle se fait l'évaporation. On emploie dans ce but un instrument nommé *atmidomètre*. Il consiste dans une cuve à section carrée contenant de l'eau; une règle verticale divisée en millimètres porte un curseur terminé par une pointe à laquelle on fait affleurer le niveau de l'eau, de manière à voir de combien il s'est abaissé par l'évaporation. De deux climats, le plus sec est celui où l'évaporation se fait le plus rapidement.

II. De la rosée et du givre.

1167. Circonstances favorables à la production de la rosée. — On donne le nom de *rosée* à des gouttelettes d'eau que l'on trouve sur la plupart des corps exposés à l'air libre, à la suite des nuits calmes et sereines.

Les circonstances favorables à la formation de la rosée sont de trois sortes :

1° L'état de l'atmosphère : la rosée ne se dépose que pendant les nuits calmes et sereines. Quand le ciel est couvert et qu'il fait du vent, il n'y a jamais de rosée ; cependant un vent léger est favorable, surtout quand il a passé au-dessus de grandes étendues d'eau. Après les jours de pluie, il se forme plus de rosée que dans les temps de sécheresse. Plus la différence de température entre le jour et la nuit est considérable et plus l'air est humide, plus il y a de rosée. Ces dernières conditions sont remplies principalement au printemps et surtout en automne, saisons où l'on observe le plus de rosée.

2° La situation du corps : Wells a constaté que la rosée se montre surtout sur les corps éloignés de tout obstacle qui pourrait leur cacher une partie du ciel. Sur les collines et dans les plaines, la rosée est plus abondante qu'au fond des vallées. Sous les arbres, prés des édifices, il n'y a pas ou il n'y a que peu de rosée.

3° La nature du corps : des corps placés dans la même exposition ne se recouvrent pas également de rosée; pour qu'ils en reçoivent, il faut qu'ils soient mauvais conducteurs et doués d'un grand pouvoir émissif. Les métaux, qui conduisent bien la chaleur et la rayonnent faiblement, ne reçoivent donc que peu de rosée. On n'en voit presque jamais sur l'or, l'argent, le cuivre, l'étain polis, et souvent un peu sur le fer, l'acier, le plomb, le zinc. Musschenbroek a remarqué, le premier, l'inaptitude des métaux à recevoir de la rosée, phénoméne que Dufay a étudié ensuite attentivement, mais sans l'expliquer, parce qu'il ne connaissait pas l'inégal pouvoir rayonnant des différents corps.

Nous voyons, en nous rappelant les effets du rayonnement nocturne (1125), que les circonstances qui favorisent la formation de la rosée, sont en même temps celles qui favorisent le refroidissement des corps à leur surface. La mauvaise conductibilité a une influence facile à concevoir; elle empêche la chaleur des parties intérieures de venir restituer aux couches superficielles, la chaleur qu'elles ont perdue par rayonnement vers un ciel serein.

1168. Explication de la rosée. — Aristote, qui avait remarqué que la rosée ne se montre que sous un ciel pur et qu'elle est moins abondante sur les montagnes que dans les plaines, la regardait comme une espèce de pluie fine provoquée par le froid de la nuit. Cette explication, adoptée depuis par divers physiciens, est incompatible avec ce fait que la rosée ne se montre pas également sur tous les corps. On a prétendu ensuite que la rosée s'élevait de la

terre, en se fondant sur ce que les cloches de verre dont on recouvre certaines plantes sont tapissées de rosée en dedans. Gersten, en 1733, soutint cette opinion, et Musschenbroek, après l'avoir adoptée, admit qu'il y avait trois sortes de rosée, l'une qui s'élevait de la surface des eaux, l'autre de la terre, et la troisiéme qui tombait d'en haut. Leroy a combattu les opinions admises de son temps; il regardait les vapeurs qui s'élévent de la terre pendant la nuit comme étant seulement une des causes de la rosée.

Théorie de Wells. — C'est au docteur Wells que nous devons la véritable explication de la rosée. Il a commencé par prouver qu'elle ne tombe pas comme une pluie. Parmi les expériences qu'il a faites pour cela, nous citerons la suivante : deux flocons de laine pesant chacun 10 grains furent placés l'un à l'air libre, l'autre au fond d'un cylindre vertical en terre cuite, de 2 pieds et demi de hauteur et d'un pied de diamétre; le premier se chargea de 16 grains d'humidité, et l'autre de 2 grains seulement. Cependant l'air était très calme. Après avoir constaté qu'un thermométre placé sur l'herbe courte marquait 4°, 5°..., et jusqu'à 8° de moins qu'un thermométre placé à 1 métre au-dessus du sol, Wells a expliqué la rosée ainsi qu'il suit.

Les corps placés à la surface de la terre rayonnent vers l'espace, et leur surface se refroidit d'autant plus que leur pouvoir émissif est plus grand, et qu'ils voient une plus grande partie du ciel; l'air qui les entoure est refroidi par leur contact et finit par se trouver saturé au moyen de la vapeur qu'il contient. Si la température s'abaisse encore un peu, cette vapeur se dépose sous forme de rosée. On voit que les choses se passent comme dans les hygrométres de condensation; toute la différence consiste en ce que le refroidissement est dû ici au rayonnement vers l'espace. Un vent léger, en renouvelant l'air qui a ainsi déposé son excès de vapeur, rend la rosée plus abondante, tandis qu'un vent prononcé en empêche la production, en réchauffant les corps par son contact, et en ne laissant pas aux couches d'air le temps de se refroidir. Plus l'air est humide, plus il arrive facilement à l'état de saturation, et plus il y a de rosée. En France, c'est par le vent du sud-ouest que la rosée est abondante; c'est par le vent du nord, en Egypte. Les métaux doués d'un faible pouvoir émissif ne se refroidissent pas assez pour condenser la vapeur. Une expérience de B. Prévost met cela en évidence : lorsqu'il fait froid, l'humidité qui régne dans l'intérieur des habitations se dépose sur les vitres, qui se refroidissent par rayonnement. Ce phénoméne s'explique comme la rosée; mais si l'on vient à appliquer une feuille d'étain sur une vitre en dehors, la partie correspondante en dedans, restera sèche ou presque séche. Si, au contraire, on met la feuille d'étain en dedans, elle se couvrira plus abondamment d'eau que les parties voisines, parce que son pouvoir absorbant étant plus faible que celui du verre, elle arrête la chaleur qui vient compenser en partie le refroidissement extérieur.

1169. Expériences de Melloni. — La théorie de Wells a produit une véritable révolution dans la météorologie, et a permis d'expliquer une foule de

faits qui ont plus ou moins d'analogie avec la rosée. Mais cette théorie avait besoin d'être complétée, pour rendre compte de certains détails jusqu'alors négligés ; et c'est ce qu'a fait Melloni[1]. Il a commencé par faire une expérience qui résume, pour ainsi dire, toutes celles qui servent de base à la théorie de Wells, afin de renverser l'hypothèse de l'ascension de la rosée, que l'on tentait de faire revivre. Melloni prit un disque en fer-blanc *mn* (*fig.* 858), dont la partie centrale *vv'* était recouverte d'une couche épaisse de vernis, dans une largeur égale au tiers de son diamètre. Un autre disque en fer-blanc *aa'*, moins large de 10^{mm} que le cercle verni, était maintenu à une distance de 5^{mm} de ce dernier, par un gros fil de fer. Cet appareil ayant été exposé horizontalement en plein air par un ciel pur, la partie vernie, qui dépassait de 5^{mm} le disque *aa'*, se refroidit par rayonnement et se couvrit de rosée; puis, le froid se communiquant aux parties voisines, la rosée se propagea vers le centre jusqu'à une certaine distance, ainsi que du côté de la circonférence, où la propagation fut plus prompte, parce que les parties, une fois humectées, rayonnaient vers l'espace. Ce qu'il y a surtout à remarquer, c'est que la partie inférieure du disque *mn* se couvrit de rosée exactement de la même manière que la partie supérieure, et au même instant sur les points qui se correspondaient. Le disque supérieur *aa'* restant sec, on voit que la rosée ne tombe pas du ciel; elle ne vient pas non plus de la terre, puisque la partie centrale du disque *mn* reste sèche en dessous.



Fig. 858.

Cela posé, Melloni démontre que la formation de la rosée est précédée d'un refroidissement préalable de la couche d'air qui touche le sol. S'il s'agit d'une prairie, les extrémités des brins d'herbe, refroidies par le rayonnement vers l'espace, abaissent la température de l'air qui les touche. Cet air glisse le long des tiges, s'échauffe au contact des parties inférieures, remonte, et ainsi de suite; de manière qu'au bout d'un certain temps l'herbe est enveloppée d'air stagnant, plus froid que celui qui touche son extrémité supérieure; ce que l'expérience directe vérifie. L'herbe pourra alors se refroidir davantage, de manière à être toujours à une plus basse température que l'air qui la touche. Pour montrer cette influence de l'air stagnant et froid autour des corps divisés, Melloni a exposé au rayonnement nocturne, deux thermomètres garnis d'une mince lame d'argent (1125). L'armure de l'un était enduite de noir de fumée, celle de l'autre était enveloppée d'un flocon de laine ou de coton. Ce dernier descendit, au bout de quelques minutes, deux fois plus que le thermomètre noirci; c'est que l'air refroidi par le contact des filaments ne pouvait s'en dégager. Si le flocon était condensé autour du thermomètre, le refroidissement était moindre.

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XXI, p. 145; et XXII, p. 129 et 467.

L'existence de cette couche d'air froide et stagnante explique certains faits qui paraissent, au premier abord, favorables à l'opinion que la rosée s'exhale de la terre : la partie moyenne de l'herbe se couvre de rosée avant l'extrémité, parce que l'air froid descend vers le sol. Une planche couverte de toile cirée et placée tout près de la terre peut recevoir de la rosée en dessous avant qu'il y en ait à la partie supérieure ; c'est qu'une fois que l'air froid a glissé en dessous, il y reste en repos, tandis que celui qui touche la partie supérieure est sujet à se déplacer. Il n'y a que peu de rosée sur les arbustes, les plantes élevées ; parce que l'air refroidi tombe à travers le feuillage, pour être remplacé par d'autre air plus chaud. On voit aussi pourquoi la rosée se forme plus abondamment pendant la seconde moitié de la nuit. Les navires en pleine mer ne reçoivent pas de rosée, le refroidissement de l'air ne pouvant avoir lieu, à cause du contact des eaux, dont la température s'abaisse à peine pendant la nuit ; il en est de même des îles de la Polynésie, dont les dimensions sont assez petites pour que l'air qui les recouvre se mélange avec celui de la mer, mélange que favorisent aussi les vents alizés.

Dans certaines mers, particulièrement dans la mer des Indes, les navires sont avertis de l'approche des côtes, par le dépôt de la rosée sur les cordages ; c'est que la brise de terre amène du rivage l'air, qui s'est refroidi pendant la nuit et s'est rapproché de l'état de saturation. Dans les pays arides, comme les déserts de l'Afrique et de l'Asie, des voyageurs ont pu être avertis du voisinage de lacs ou de fleuves, par l'apparition de la rosée.

1170. Givre. — Le *givre* ou *gelée blanche* se forme comme la rosée : quand la température des corps descend au-dessous de 0°, l'humidité de l'air passe à l'état solide, *sans passer par l'état liquide*, et forme une couche de glace spongieuse dont l'épaisseur augmente peu à peu. On dit souvent que le givre est de la rosée congelée ; mais il est facile de voir que la vapeur ne s'est pas déposée d'abord à l'état liquide ; car, s'il en était ainsi, le givre se présenterait sous forme de petits mamelons de glace amorphe et transparente, et non de couche cristalline opaque, dans laquelle on distingue souvent des prismes implantés les uns à côté des autres à la surface des corps. C'est au printemps et en automne que les corps peuvent se refroidir assez par le rayonnement pour qu'il y ait formation de givre.

Les couches de glace arborisées qui se voient pendant l'hiver sur les vitres, dans des appartements, s'expliquent comme le givre ; elles forment une espèce de rideau qui retient la chaleur intérieure.

Quand un vent chaud et humide succède à un froid vif et prolongé, tous les corps se recouvrent d'une couche de glace à structure cristalline formant, sur les arbres et sur les fils d'araignée qu'ils supportent, des guirlandes, qui étincellent au soleil. Ces productions sont connues aussi sous le nom de *givre*, quoiqu'elles aient une toute autre origine, puisque la basse température des corps n'est pas due ici au rayonnement nocturne, et que cette espèce de givre se forme aussi bien pendant le jour que pendant la nuit.

1171. Drosomètre. — La quantité de rosée que reçoit annuellement un pays est souvent importante à considérer. En effet, quoiqu'elle ne représente qu'une très petite quantité d'eau, elle atténue les effets de la sécheresse sur les plantes, et, dans les climats froids, elle les empêche de geler en leur cédant la chaleur latente de la vapeur qui se condense. Si cette vapeur passe à l'état de givre, elle cède encore 79 calories, et forme une enveloppe préservatrice qui atténue les effets du rayonnement.

On n'a recueilli que très peu d'observations sur la rosée. Tantôt on compte le nombre de nuits où il s'en dépose, tantôt on mesure la couche d'eau qu'elle représente. Les instruments dont on se sert alors se nomment *drosomètres*. Flaugergues employait une plaque de métal peinte à l'huile, et M. de Gasparin, un plateau de verre; on recueille l'eau qui ruisselle de la surface, et l'on tient compte de celle qui y adhère, en partant d'expériences préalables.

On conçoit que la position de l'instrument, et le pouvoir rayonnant de la substance dont il est formé, doivent avoir une grande influence sur les résultats. Aussi les nombres trouvés laissent-ils beaucoup d'incertitude, eu égard surtout à la petitesse des quantités à mesurer. On a reconnu que la rosée qui se forme annuellement dans le midi de la France et en Italie, forme une couche d'un peu plus de 6^{mm}. C'est en octobre, novembre et mai, qu'il s'en dépose le plus; en janvier, février, mars et avril, il s'en forme très peu; et en août, à peine plus qu'en mai.

III. Météores produits par la condensation de la vapeur dans l'atmosphère.

1172. Condensation des vapeurs dans l'atmosphère. — Lorsque l'air se refroidit par une cause quelconque, de manière à se trouver saturé par la vapeur qu'il contient, cette vapeur se précipite sous la forme de gouttelettes d'eau extrêmement fines, qui restent en suspension à cause de leur faible poids, comme ces poussières fines et sèches que l'air soutient malgré leur grande densité. L'adhésion de l'eau pour l'air concourt aussi à ce résultat. Ces gouttelettes d'eau troublent la transparence de l'air; elles forment les *brouillards* ou les *nuages*, suivant qu'elles se montrent près de la surface de la terre ou dans les régions élevées de l'atmosphère. On peut réaliser en petit la production d'un brouillard, en laissant échapper de l'air humide comprimé, ou en faisant rapidement le vide sous un récipient: on voit un léger brouillard, qui se dissipe bientôt, parce que l'air, refroidi d'abord par la raréfaction, se réchauffe au contact de la cloche, et les gouttelettes repassent rapidement à l'état de vapeur. Dans les sas à air comprimé (I, 344), on observe souvent la précipitation de la vapeur quand on rétablit la pression atmosphérique. La vapeur de l'eau chaude produit souvent un nuage épais, comme on l'observe dans les cabinets de bains, en se condensant dans l'air plus froid.

De la vapeur vésiculaire. — Pour expliquer la suspension dans l'air des particules qui composent les brouillards et les nuages, on a admis il y a longtemps, et quelques-uns admettent encore, que ces particules sont formées de globules creux remplis d'air saturé, d'une petitesse extrême et assez légers pour flotter dans l'air ; on donne à ces globules le nom de *vapeur vésiculaire*. Combattu d'abord par Desaguillier, le système de la vapeur vésiculaire a été mis en faveur par Saussure, et pendant quelque temps universellement adopté, puis combattu de nouveau par Monge. Kratzenstein a fait de nombreuses observations sur la grosseur des prétendues vésicules et sur leurs propriétés optiques. Voici les principaux arguments que l'on invoquait pour en prouver l'existence : 1° Les particules des brouillards rebondissent sur l'eau ou sur les corps secs ; mais on sait qu'il en est de même de gouttes d'eau massives ayant plusieurs millimètres de diamètre, comme on peut s'en assurer en frappant dans l'eau avec un bâton par un temps sec : on voit des gouttes rouler sur l'eau sans s'y mêler. 2° L'arc-en-ciel ne se produit pas dans les nuages comme dans les gouttes de pluie : c'est que les gouttelettes des nuages sont tellement petites que les rayons colorés qui en sortent, comme nous l'expliquerons dans l'optique, sont en trop petit nombre pour impressionner l'œil. Ce qui prouve, en outre, que les particules qui composent les nuages et les brouillards ne sont pas creuses, c'est qu'elles rassemblent les rayons du soleil comme les lentilles, ce que l'on voit quand on les arrête sur quelque corps léger. De plus, les nuages n'intercepteraient pas aussi complètement les rayons lumineux s'ils étaient composés de vésicules creuses ; et enfin on voit que ces vésicules se resserreraient et se transformeraient bientôt en gouttelettes pleines, par la cohésion de l'eau pour elle-même, l'air intérieur passant au dehors après s'être dissous dans la pellicule liquide excessivement mince qui forme l'enveloppe (I, 330). Cet effet de la cohésion se voit sur les bulles de savon, qui diminuent rapidement de volume quand l'air qu'elles contiennent peut s'échapper par le tube qui a servi à les souffler. L'existence de la vapeur vésiculaire n'est prouvée par aucun fait ; elle n'est pas nécessaire pour expliquer les phénomènes ; il est donc à désirer qu'on renonce unanimement à une hypothèse gratuite qui ne peut qu'entraver la marche de la science.

1173. Des nuages et de leur forme. — Les nuages présentent des formes très variées. On est parvenu cependant à les ramener à quelques types principaux. Howard et Lampadius ont distingué les formes suivantes, dont les plus importantes sont représentées dans la *fig.* 859. Les *cumulus* sont des nuages à contours arrondis, comme amoncelés, et présentant à leur partie inférieure une base plane et horizontale. On les observe principalement quand il fait chaud ; aussi sont-ils désignés souvent sous le nom de *nuages d'été*. Les *stratus* sont disposés en couches horizontales ; ils apparaissent principalement au coucher du soleil, et disparaissent à son lever. Les *cirrus* présentent l'apparence de flocons déliés, irrégulièrement distribués ; ils se montrent quand, après le beau temps, le baromètre commence à baisser et le vent du

sud, à souffler. Les cirrus sont les nuages les plus élevés; leur hauteur peut aller au-delà de 7,000^m; on les regarde comme formés de petites aiguilles de glace en suspension dans l'air. C'est, en effet, dans ces sortes de nuages qu'apparaissent les halos et les parhélies, météores produits par le jeu de la lumière dans de petits prismes de glace. Les *nimbus* sont des nuages sombres très étendus en tous sens et donnant de la pluie. Souvent ils sont limités d'une manière tranchée et terminés par des contours brillants (*fig.* 859); souvent aussi ils couvrent toute l'étendue du ciel.

Entre les quatre types que nous venons de citer se placent d'autres espèces de nuages, que l'on désigne en associant les noms de ceux auxquels ils ressemblent le plus. Ainsi, l'on distingue les *cirro-stratus*, les *cumulo-stratus* et les

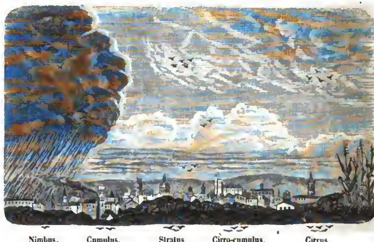


Fig. 859.

cirro-cumulus. Quand ces derniers couvrent une assez grande étendue, on dit que le ciel est *pommelé*.

Pour bien distinguer la forme des nuages, il faut amortir leur trop grand éclat, en les regardant à travers un verre bleu assez foncé, ou dans un miroir en verre noir. On distingue alors beaucoup de particularités qui échappent à la vue simple. Du reste, vus de près, les nuages ressemblent tout à fait à des brouillards, et les voyageurs qui voient dans les montagnes des nuages à contours bien déterminés, sont tout étonnés en arrivant à leur niveau et en pénétrant dans leur intérieur, de ne plus leur trouver de limite certaine.

La hauteur des nuages est très variable. Quand un brouillard couvre une vaste étendue de pays, on peut le regarder comme un nuage qui touche la terre. On voit des nuages assez bas pour cacher le haut des édifices.

Gay-Lussac, à 7000^{m} de hauteur, voyait au-dessus de sa tête des nuages qui lui semblaient encore à une hauteur considérable, qu'il évaluait à 5000^{m}; ce qui fait en tout 12000^{m}. A cette hauteur, la pression n'est que de 60^{mm}, et la température de —34°. La région où il se forme le plus de nuages est celle dans laquelle la température décroît le plus rapidement; nous avons vu (1119) qu'elle est située à 3000^{m} de hauteur environ.

1174. Formation des nuages. — Les vapeurs produites à la surface de la terre par la chaleur que fournit le soleil, tendent, par leur force expansive, à se répandre en tous sens, notamment de bas en haut, et à former une atmosphère de vapeur de densité décroissant avec la hauteur, et indépendante de celle que forme l'air (I, 386). La présence de ce dernier gaz ne fait que ralentir la diffusion de la vapeur. Si la température était la même à toute hauteur, et si l'air était en repos, il finirait par s'établir un état d'équilibre, dans lequel chaque couche de vapeur aurait une force élastique égale au poids des couches supérieures. La pression h, dans chaque couche, pourrait se calculer au moyen de la formule $ne = \frac{1}{c} \log \frac{H}{h}$, dans laquelle ne est la hauteur de la couche, H la pression à la surface du sol, et c une constante qui dépend du poids spécifique de la vapeur (I, 397). Mais comme la température s'abaisse à mesure qu'on s'élève, il pourra se faire que la pression h, correspondant à une certaine hauteur, soit supérieure à la tension maximum de la vapeur à la température qui règne à cette hauteur. C'est précisément ce qui a lieu avec la loi du décroissement de la température telle que l'observation l'a établie (1119). La vapeur se condensera donc en gouttelettes, en arrivant dans les régions élevées de l'atmosphère. De nouvelles vapeurs viendront alors des parties inférieures, puisque la vapeur qui s'y trouve ne supportera plus un poids suffisant pour faire équilibre à sa force élastique, et il se formera un nuage. On voit qu'il n'y a pas lieu de chercher comment les gouttelettes montent, puisqu'elles ne se forment qu'après que l'eau qui les compose s'est élevée à l'état de vapeur invisible, par la force expansive propre à tous les fluides élastiques. D'après les calculs de M. Saigey, si le décroissement de la température quand on s'élève, était environ 4 fois plus lent, la vapeur ne se condenserait pas, et il ne se formerait pas de nuages.

Cette cause de la formation des nuages n'est pas la seule. Les vapeurs terrestres peuvent encore être transportées à une grande hauteur par les courants d'air ascendants que provoque l'échauffement du sol. Ces courants donnent naissance ordinairement à des *cumulus*, et souvent le ciel, pur le matin, est rempli de ces nuages à midi. Saussure explique les formes arrondies des cumulus, par la pénétration dans les couches élevées, de la colonne d'air ascendante, dont ces nuages dessinent alors la limite supérieure.

Toute cause qui refroidit l'air humide détermine la formation de nuages. A la fin des journées chaudes, surtout après un temps de pluie, il se forme des nuages qui augmentent pendant la nuit, et se dissipent souvent le lendemain

matin sous l'action de la chaleur solaire. On peut assister à cette formation des nuages quand on se trouve sur une montagne. Un vent froid qui arrive dans l'air humide, un vent chaud et humide qui pénètre dans l'air froid, donnent aussi lieu à une précipitation de vapeur.

Quand il fait chaud, on remarque souvent plusieurs étages de nuages superposés, dont les plus élevés apparaissent les derniers. Voici comment cela s'explique : une fois qu'il s'est formé une couche de nuages, par les causes que nous avons énumérées, le soleil en échauffe la partie supérieure, dont le pouvoir absorbant est assez grand, et les gouttelettes se transforment en vapeur. Cette vapeur s'élève par expansion, parvient dans des couches plus élevées et plus froides, et se condense en formant un nouveau nuage. Ce dernier, échauffé à son tour par les rayons solaires, produit de la vapeur, qui va se condenser encore plus haut.

On voit souvent des nuages se former dans les montagnes autour des sommets isolés. Ces nuages sont produits par le refroidissement de l'air dans le voisinage des pics. Souvent ils sont emportés par le vent et se dissipent un peu plus loin en retrouvant une température plus élevée ; mais ils sont sans cesse reproduits par l'air affluent, qui se refroidit à son tour, de manière que le nuage est permanent, mais constitué par des gouttelettes d'eau sans cesse renouvelées.

De la suspension des nuages. — On s'est préoccupé en tout temps d'expliquer comment les nuages se soutiennent dans l'air, et c'est pour cela qu'on avait imaginé la vapeur vésiculaire. Cette suspension des nuages est due à plusieurs causes : d'abord aux courants ascendants qui règnent pendant le jour ; en effet, on remarque que les cumulus qu'ils produisent s'élèvent vers midi et s'abaissent le soir quand ces courants s'affaiblissent. Ainsi, M. Kaemtz a vu, dans les montagnes, les nuages, au-dessous de lui dans la matinée, l'envelopper ensuite, puis s'élever au-dessus de sa tête ; le soir, ils redescendaient vers la plaine. Le vent, qui entraîne les gouttelettes horizontalement, retarde aussi leur chute. Remarquons encore que souvent les particules des nuages tombent réellement ; mais une fois arrivées dans des couches d'air plus chaudes et non saturées, elles s'évaporent, de sorte que le nuage s'use, pour ainsi dire, par la partie inférieure, et finit souvent par disparaître complètement ; de là la forme aplatie et horizontale des cumulus à leur partie inférieure, et les changements continuels de forme que présentent les nuages. Enfin, Fresnel a signalé une autre cause de suspension des nuages : la chaleur du soleil, en pénétrant leur masse, les dilate au point d'en former un ensemble, composé de gouttelettes séparées par de l'air chaud et saturé, et qui possède une densité moindre que celle de l'air ambiant.

1175. DE LA PLUIE. — Les nuages que l'on voit flotter dans l'air ne donnent pas généralement de pluie. La pluie vient de *nimbus*, qui la produisent dès le moment de leur formation. Il peut cependant arriver que des cumulus donnent de la pluie ; quand l'air étant très humide, les gouttelettes en suspension dans

le nuage grossissent par la condensation de nouvelles vapeurs, et finissent par tomber. Souvent les gouttes ainsi formées disparaissent, en s'évaporant, avant d'arriver à terre; de loin, on aperçoit des traînées dirigées de haut en bas et n'arrivant pas jusqu'au sol.

Théorie de Hutton. — La formation des *nimbus* peut provenir de plusieurs causes. Hutton, dès 1784, les expliquait au moyen du principe suivant : quand deux masses égales d'air saturé à des températures différentes se rencontrent, la température moyenne du mélange est trop faible pour qu'il puisse contenir toute la vapeur des masses d'air réunies. Cela tient à ce que la tension maximum de la vapeur décroît beaucoup moins vite que la température (974); ce qui fait que l'air le plus froid, en s'échauffant, prend moins de vapeur pour achever de se saturer, que l'air le plus chaud n'en abandonne en se refroidissant du même nombre de degrés. Il y aura donc précipitation de vapeur. Le même résultat pourra avoir lieu, si les deux masses d'air, sans être saturées, sont très humides. Quand deux courants d'air se rencontreront dans les régions élevées de l'atmosphère, il pourra donc se former un *nimbus*, et il tombera de la pluie, les gouttelettes grossissant rapidement. Les gouttes, en tombant, se réunissent les unes aux autres, de manière à devenir de plus en plus grosses; si bien que l'on peut juger de la hauteur d'où vient la pluie, par leur grosseur. Des gouttes très fines indiquent que la pluie prend naissance à une petite hauteur.

Théorie de M. Babinet. — Ce mode de formation des nimbus doit être assez rare, et ne suffirait pas pour expliquer la fréquence du phénomène de la pluie. M. Babinet a indiqué une autre cause qui permet de rendre compte d'une foule de particularités relatives à ce météore : quand le vent rencontre un obstacle, l'air en mouvement s'élève, par un effet analogue à celui du bélier hydraulique; il se refroidit en se raréfiant, et abandonne à l'état de pluie toute la vapeur qui dépasse la quantité nécessaire à la saturation. On voit pourquoi le vent de mer donne de la pluie : retardé par la résistance qu'oppose à sa marche le relief des côtes, les arbres, les collines..., il fait obstacle à la marche de l'air affluent, et ce dernier s'élève, se refroidit et donne d'autant plus de pluie qu'il est plus chaud et plus humide. C'est ainsi que, en France, les vents d'ouest fournissent les pluies qui alimentent les bassins des fleuves qui se jettent dans l'Océan.

Quand un vent humide rencontre une chaîne de montagnes, l'air en mouvement s'élève sur ses flancs en se refroidissant, et dépose ces neiges éternelles, où les grands cours d'eau prennent leur source. C'est ainsi que, dans les Alpes, les vents d'ouest donnent naissance au Rhône et au Rhin, et le vent d'est, au Danube [1]. Le refroidissement de l'air, qui s'élève sur le flanc des montagnes, a été constaté directement par M. Rozet, dans les Pyrénées. Deux observateurs furent placés sur une pente bien graduée, par un vent qui la remontait; le

[1] M. Babinet, *Etudes et lectures sur les sciences d'observation*, t. II, p. 209.

thermomètre de celui qui était en haut de la pente fut toujours beaucoup plus bas que celui de l'autre observateur.

On peut expliquer par les mêmes principes pourquoi la pluie succéde fréquemment au vent. Supposons qu'un vent d'aspiration régne depuis quelque temps, et que la cause qui le produit cesse d'agir, l'air affluent se pressera sur la masse d'air qui s'est arrêtée, s'élèvera et déposera la vapeur qu'il contient. On voit que le proverbe : *petite pluie abat le vent*, doit être renversé ; car c'est la cessation du vent qui provoque la pluie. Le relèvement des masses d'air, à la rencontre d'un obstacle formé par d'autre air, est mis en évidence d'une manière frappante dans l'observation suivante : M. Trémaux, étant monté sur la plus grande des pyramides d'Egypte, du côté où soufflait un vent violent, trouva avec surprise un calme complet sur le sommet. L'air, en se relevant sur les flancs de la pyramide, formait un obstacle au vent supérieur; en effet, divers corps ayant été lancés contre le vent, ils s'élevérent, puis furent ramenés en cercle par dessus la tête de l'observateur, et emportés de l'autre côté de la pyramide.

Les tornados, dans lesquels monte une colonne d'air chaud et humide (1152), donnent aussi naissance à des pluies abondantes. Ils peuvent, ainsi que le principe de Hutton, rendre compte des pluies soudaines, et de la formation rapide des *nimbus* au milieu d'une atmosphère sereine.

1176. Pluies singulières. — On voit quelquefois la pluie tomber sans qu'il y ait d'apparence de nuage au ciel. De Humboldt en cite plusieurs cas observés entre les tropiques; depuis, on en a constaté des exemples dans toutes les parties du monde. M. Babinet a observé une pluie sans nuage, à Paris. Le phénomène ne dure ordinairement que quelques instants; on l'attribue à une condensation de vapeur assez rapide pour que les gouttelettes atteignent immédiatement un assez grand diamètre; mais on comprend difficilement quelles peuvent être les conditions d'une condensation aussi brusque.

Serein. — Le serein est une pluie fine sans nuage, qui tombe pendant quelques instants à la fin de certaines journées chaudes et humides. Il est dû au refroidissement de l'air après le coucher du soleil. Comme les gouttes sont ici trés petites, on n'éprouve pas de difficulté à en concevoir la formation.

Quelquefois la pluie est accompagnée de différentes substances qu'elle enléve à l'atmosphére et qui lui donnent des apparences diverses, dont les populations ont été souvent effrayées. Ces substances sont des cendres volcaniques, des poussières rouges apportées des déserts par les vents, du pollen de diverses espéces de pins... On a ainsi les pluies de boue, de sang, de soufre... Dans les temps d'orage, il se produit d'autres phénoménes singuliers, sur lesquels nous reviendrons.

1177. DE LA NEIGE. — Quand un nimbus se forme dans un espace très froid, la vapeur se condense à l'état solide, sans passer par l'état liquide, comme dans la formation du givre, en donnant naissance à une multitude de particules de glace, qui s'accrochent les unes aux autres, et tombent lentement à cause

de leur faible masse; on a alors de la *neige*. Souvent cette neige fond avant d'arriver à terre, et l'on a vu quelquefois la pluie tomber dans la plaine, pendant que, du même nuage, il tombait de la neige sur la montagne.

On peut, dans certaines circonstances, observer directement la précipitation de la vapeur à l'état solide. En 1737, les académiciens français, occupés à la mesure d'un arc du méridien en Laponie, voyaient l'atmosphère chaude et humide de leur chambre se remplir de particules de glace flottantes, quand en ouvrant la porte, ils laissaient entrer l'air extérieur, qui était extrêmement froid. De semblables observations se font souvent en Sibérie. On voit que la neige est à la pluie comme le givre est à la rosée; ce que Sénèque exprimait en disant que « la neige est une congélation flottante de la nature des gelées blanches. »

Forme de la neige. — Les flocons de neige sont composés de petits cristaux en forme d'étoile accrochés les uns aux autres; de manière que les



Fig. 860.

flocons sont d'autant plus gros que la neige se forme à une plus grande hauteur. Ces petites étoiles présentent une régularité et une variété de formes merveilleuses, qui avaient excité l'admiration de Kepler, qui en a fait le premier une étude attentive. Elles présentent 3, 6 ou 12 parties symétriquement disposées autour d'un axe ou autour d'un point, et faisant entre elles des angles égaux. Pour les observer, il suffit de recevoir la neige, par un temps froid et sec, sur du drap noir; quelquefois elles ont jusqu'à 5^{mm} de diamètre, d'autres fois on ne peut les distinguer qu'avec une forte loupe. On en connaît de plusieurs centaines de formes différentes. Scoresby en a dessiné 96, qu'il a observées dans les régions polaires. Il les ramène à 5 types principaux, dont la figure 860 montre quelques spécimens :

1° Des lamelles minces transparentes, telles que *a*, *b*, *c*, *e*, *f*, *h*, *i*, *k*; dans toutes, les lignes parallèles aux côtés de l'hexagone sont d'un blanc mat. La forme *a* est la plus commune dans nos climats; elle se présente surtout quand

la température diffère peu de 0°. Les figures *b* et *c* s'observent à des températures très diverses ; plus il fait froid, plus les lamelles sont minces et délicates ; elles peuvent avoir 0,2 à 0,3 millimètres de diamètre. On voit en *d* une coupe transversale d'une de ces lamelles. Les formes *e* et *f* s'observent par les froids intenses.

2° Des lamelles hérissées d'aiguilles sur une seule face ou sur les deux, pouvant avoir jusqu'à 5mm de diamètre ; ou bien un noyau opaque ou transparent hérissé d'aiguilles dans tous les sens ou dans un seul plan. On voit en *l* la coupe d'un cristal de ce dernier genre.

3° Des prismes très menus à 3 ou 6 pans, transparents ou opaques. Il y en a qui sont aussi fins qu'un cheveu, avec une longueur de 4 à 5mm.

4° Des pyramides régulières à 6 faces. Scoresby n'en a vu qu'une seule fois.

5° Des prismes présentant à l'une des extrémités ou aux deux, des lamelles hexagonales, comme *m* et *n*.

Pour que les étoiles de neige soient bien régulières, il faut que l'air soit calme, froid et sec. Dans le cas contraire, les aiguilles sont mal conformées, opaques, ou brisées. Les étoiles de glace semblent se former successivement : quand la neige prend naissance par un temps très froid, elle forme une poussière blanche qui laisse distinguer au microscope de petits tétraèdres réguliers. Quand ces petits cristaux traversent des couches humides, la vapeur dépose sur leurs faces, des molécules qui prennent les dispositions régulières dont nous venons de parler.

On peut assister à la formation des étoiles de neige, en soufflant des bulles de savon par un temps très froid ; on voit de petites aiguilles se former dans la pellicule d'eau et s'implanter les unes sur les autres, en prenant des dispositions variées.

1178. Divers états de la neige. — Grésil. — Quand l'air est agité, les parcelles octaédriques dont nous avons parlé se groupent d'une manière irrégulière et forment de petites masses spongieuses, opaques ou demi-transparentes, auxquelles on donne le nom de *grésil*. Quelquefois les grains sont couverts d'une couche de glace transparente qui indique un commencement de fusion suivie d'une nouvelle congélation ; d'autres fois les grains ont une forme conique, et on distingue dans l'intérieur des rayons, qui partent du sommet. Dans nos climats, le grésil tombe au commencement du printemps.

Verglas. — Quand la neige répandue sur le sol fond en partie et se congèle ensuite, elle forme une espèce de glace dure de structure irrégulière, à laquelle on donne le nom de *verglas*. On désigne aussi sous ce nom la couche de glace qui se forme quand, au moment d'un dégel, la pluie tombe en petite quantité sur la terre nue et encore glacée.

Neige rouge. — La neige présente quelquefois une couleur d'un rouge vif. Ce phénomène a été observé par Saussure sur les montagnes des Alpes ; il a reconnu que la couleur était due à une poudre fine mêlée à la neige jusqu'à une profondeur de 6 à 8mm seulement. On a vu aussi de la neige rouge dans les

régions voisines de l'un et de l'autre pôle. M. Francis Bauer a reconnu que la poudre rouge n'est autre chose qu'un petit champignon microscopique du genre *uredo*, auquel il a donné le nom de *uredo nivealis*. Il a pu, au moyen de la poudre rouge rapportée du pôle nord par le capitaine Ross, voir ce champignon se reproduire et multiplier dans l'eau ; mais les individus nouvellement produits étaient toujours blancs ou verdâtres. Ce n'est qu'en opérant dans la neige, qui paraît être comme leur *sol naturel*, qu'il leur a vu prendre leur couleur rouge. Pline paraît avoir observé la neige rouge, car il dit que la neige rougit en vieillissant.

Il tombe quelquefois de la neige présentant une teinte rouge ; mais ici cette couleur est due à une poussière minérale, de même origine que celle qui colore quelquefois la pluie (1176).

1179. De la quantité annuelle de neige. — La quantité de neige qui tombe annuellement à la surface de la terre est d'autant plus grande qu'on se rapproche davantage du pôle. A l'équateur, on n'en voit jamais au niveau de la mer. Dans nos climats, la neige qui tombe annuellement représente $\frac{1}{10}$ de la quantité d'eau fournie par les pluies ; elle ne tombe que pendant trois mois. A la latitude de Pétersbourg, la neige forme $\frac{1}{3}$ de l'eau que donne la pluie. On admet généralement qu'une couche de neige équivaut à une couche d'eau égale à $\frac{1}{12}$ de son épaisseur ; mais ce mode d'évaluation n'est qu'une grossière approximation, parce que la densité de la neige est très variable, suivant la température et la grosseur des flocons ; elle varie de $\frac{1}{3}$ à $\frac{1}{8}$. De plus, il faut une grande circonspection pour en apprécier l'épaisseur, qui peut changer dans un espace même restreint, le vent tendant à la pousser dans les parties déclives. Le mieux serait de recueillir avec soin la neige qui recouvre un mètre carré sur un terrain uni et découvert, et de mesurer le volume d'eau qu'elle fournit en fondant.

La neige ne tombe dans nos climats que par les froids modérés. On n'en voit guère quand la température est au-dessous de — 12° ; c'est que par les grands froid règnent les vents du nord, qui se dessèchent en s'échauffant un peu, quand ils arrivent dans des régions moins froides.

La neige répandue sur le sol préserve les plantes du rayonnement, et empêche, par sa mauvaise conductibilité, leur chaleur de se communiquer à l'air. M. Rozet a vu un thermomètre placé sous la neige ne varier que de 0° à —2°, pendant qu'un autre, suspendu dans l'air, variait de —1° à —6°,5. Un thermomètre plongé au fond d'une rigole creusée dans la neige, se trouvait de 1° plus bas que celui qui était caché sous la neige. Une simple feuille de papier blanc placée sur la rigole, produisait le même effet qu'une couche de neige de 5^{cm}. M. Teissier a constaté, pendant l'hiver rigoureux de 1789, que la terre s'était gelée jusqu'à 60^{cm} de profondeur sous la neige, et jusqu'à 92^{cm} dans des places toutes voisines, d'où le vent avait enlevé la neige.

1180. — DES BROUILLARDS. — Les brouillards ne sont autre chose que des nuages qui se forment à la surface de la terre, par suite de l'abaissement de la

température de l'air, ou par l'arrivée du vent chaud dans les couches atmosphériques inférieures. Quand le brouillard est très épais, il porte le nom de *brume*. Quand la condensation de la vapeur est assez abondante pour que les gouttelettes tombent à mesure qu'elles se forment, on dit qu'il *bruine*. L'observateur plongé dans la brume assiste alors à la formation même de la pluie, seulement les gouttes sont très petites, parce qu'elles viennent de se former. Il y a des brouillards assez épais pour produire une obscurité complète en plein midi; on en a vu de semblables à Londres, à Paris, à Amsterdam...

Brouillards locaux. — Indépendamment des brouillards généraux qui couvrent en même temps de vastes régions, il existe des brouillards moins étendus qui se forment chaque jour, en certaines saisons, après le coucher du soleil, sur les lacs et les rivières ou dans les prairies basses et humides, ou bien encore sur mer, à proximité des côtes. Ces brouillards s'expliquent ainsi: l'air qui recouvre les bords des eaux se refroidit par le contact du sol, dont la température s'abaisse par le rayonnement. Cet air descend sur la surface de l'eau, dont la température change à peine (1115), et se mêlant à l'air saturé qui la recouvre, en précipite la vapeur.

Des expériences directes, faites sur le Danube par H. Davy, ont fait voir, en confirmation de cette explication, que l'eau est en effet plus chaude que l'air, lorsque de semblables brouillards se forment. Ces brouillards disparaissent ordinairement après le lever du soleil. Au printemps, quand ils remplissent le fond des vallées, on les voit souvent s'élever, sous l'influence de la chaleur du soleil, gagner le haut des collines qui jusque-là les dominaient, puis monter et former des nuages, ou bien se dissiper par l'effet de la chaleur croissante. Souvent, pendant l'été et l'automne, quand l'air est calme et quelque temps avant le lever du soleil, on voit se former à la surface des eaux, de véritables petits nuages qui sont entraînés par le courant ascendant que détermine la chaleur de l'eau, et vont se réunir à une certaine hauteur, ou se dissipent si l'air est sec.

Il se forme encore des brouillards au moment du dégel, quand un vent chaud se refroidit au contact du sol encore glacé. Pendant l'été, on voit aussi des brouillards se former sur les rivières après les pluies d'orage; c'est que la pluie, très froide parce qu'elle vient du haut de l'atmosphère, abaisse la température de la surface des eaux, de manière que l'air qui vient au contact de cette surface se refroidit et laisse précipiter sa vapeur.

Brouillards secs. — On observe quelquefois dans certains pays des brouillards qui n'affectent pas l'hygromètre et déterminent une évaporation assez rapide pour être très préjudiciable aux plantes. Le soleil, vu à travers ces sortes de brouillards, paraît d'un rouge vif. En 1783, un brouillard semblable s'étendit sur toute l'Europe, et persista pendant plus d'un mois. En 1831, un autre brouillard sec a été observé en France, sur les côtes d'Afrique et jusqu'en Amérique, à différentes dates du mois d'août. On est porté à attribuer ces sortes de brouillards à des poussières impalpables répan-

dues dans l'air, apportées par les vents d'Afrique, ou bien provenant de cendres volcaniques. En effet, le brouillard sec de 1783 fut précédé, un mois auparavant, par les éruptions des volcans d'Islande, et par les tremblements de terre qui bouleversèrent la Calabre et ensevelirent plus de 40,000 habitants sous les débris des montagnes, les ruines des édifices, et dans les profondes crevasses dont le sol fut sillonné ; des volcans nouveaux surgirent dans la mer, près de l'Islande, et lancèrent une fumée épaisse qui persista jusqu'à la fin de juillet ; à Gleicken, en Saxe, il se forma un foyer d'où il s'échappa une fumée fétide qui dessécha les plantes, et se répandit jusque sur la mer Adriatique.

1181. Brouillards glacés. — Dans les régions polaires, on voit se former au-dessus des eaux, des brouillards épais composés d'aiguilles de glace extrêmement fines, mais cependant visibles, parce qu'elles réfléchissent vivement la lumière. Ces aiguilles s'accrochent à tous les corps. Elles se produisent en France par les grands froids, et sont désignées sous le nom de *flèches glaciales*, *spicula*. M. Fournet en cite plusieurs cas[1]. En 1820, il observa un brouillard glacé qui donnait à l'atmosphère un éclat singulier, et qui, en se déposant sur la tour de la cathédrale, l'enveloppa d'une sorte de duvet éclatant qui faisait ressortir d'une manière admirable les délicates sculptures qui la décorent. M. Fournet a reconnu que la précipitation à l'état solide a lieu, de —12° à —15° ; à une température moins basse, la précipitation se fait à l'état liquide, ce qui se conçoit d'après ce que nous avons dit de la basse température que peuvent supporter les fines gouttelettes d'eau, sans se congeler (916). — La neige exige probablement pour se former une aussi basse température.

Cirrus. — Quand des brouillards glacés prennent naissance dans les régions supérieures de l'atmosphère, ils constituent des *cirrus*. Dans leur ascension aérostatique, en 1850, MM. Bixio et Barral se sont trouvés dans de semblables brouillards, ou plutôt dans des *nuages* de particules glacées. Dans une ascension faite à Kew, en 1852, on a aussi observé des nuages glacés. La température était de —10°,5 et de — 15°, ce qui rentre dans les limites assignées par M. Fournet.

IV. Distribution de l'eau atmosphérique à la surface du globe.

1182. De l'arrosage du globe. — La surface du globe est aux trois quarts recouverte par les eaux, l'autre quart est occupé par les continents et les îles. Les terres seraient constamment sèches et arides, sans l'évaporation qui se fait à la surface des mers, sous l'influence de la chaleur solaire. Les

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XLVI, p. 203.

vapeurs formées parviennent aux régions élevées de l'atmosphère, s'y condensent, et versent ou déposent sur la terre, l'eau nécessaire à son irrigation. Une première portion de cette eau s'évapore, une seconde pénètre dans le sol, et donne naissance aux sources, une troisième portion coule sur les pentes, se rend dans les parties basses, et alimente les lacs ou les rivières. Les neiges, accumulées sur les montagnes, glissent en avalanches dans les vallées transversales et forment les glaciers, dont la fonte donne naissance aux sources de la plupart des grands cours d'eau.

C'est surtout à l'état de pluie que l'eau atmosphérique vient arroser le globe. La rosée ne fournit qu'une quantité d'eau insignifiante; mais son rôle n'en est pas moins important, car elle atténue les effets du rayonnement nocturne sur les végétaux, et leur fournit une humidité précieuse dans les contrées privées de pluie. Les brouillards agissent de la même manière; de plus, dans certains pays froids, ils adoucissent la température en empêchant le rayonnement du sol vers l'espace. La neige, comme nous l'avons vu, ne fournit que peu d'eau; nous avons aussi indiqué le rôle qu'elle joue pour préserver le sol du froid.

1183. Mesure de la quantité de pluie. — Les instruments dont on se sert pour évaluer l'épaisseur de la couche d'eau qui tombe en un lieu à l'état de pluie, se nomment *pluviomètres*, *udomètres*, *ombromètres* ou *hyétomètres*. Le plus simple consiste en un vase cylindrique (*fig.* 861) portant un tube latéral *t* muni d'une échelle, dans lequel on aperçoit le niveau de l'eau. La partie supérieure est fermée par un entonnoir *a*, pour éviter la perte par évaporation. En *c* est une cloison percée d'un petit trou; l'instrument est toujours rempli d'eau jusqu'à cette cloison, qui sert de point de départ, et correspond au zéro de l'échelle du tube *t*. L'épaisseur de la couche d'eau tombée au bout d'un certain temps s'observe immédiatement sur cette échelle. Quelquefois la section droite de l'entonnoir est beaucoup plus grande que celle du vase cylindrique. Il faut alors diviser la hauteur de l'eau recueillie, par le rapport entre les deux sections, et l'erreur de lecture est ainsi atténuée.



Fig. 861.



Fig. 862.

La *fig.* 862 représente l'udomètre de M. Babinet : l'eau qui tombe dans le vase à entonnoir est mesurée de temps en temps, dans une éprouvette graduée. Des expériences préalables font connaître le rapport entre les sections de l'entonnoir et de l'éprouvette.

M. Flaugergues a imaginé un udomètre qui indique séparément les quantités de pluie qui tombent pendant chacune des directions principales du vent. L'entonnoir de cet instrument est mobile autour d'un axe vertical, et muni d'une lame qui fait fonction de girouette. Un tube descend verticalement du

fond de l'entonnoir, et se recourbe à angle droit dans le plan de la girouette. Ce tube dirige l'eau de la pluie dans l'un des huit compartiments égaux d'une couronne disposée comme celle de la *fig*. 832. On mesure ensuite l'épaisseur de la couche d'eau déposée dans chaque compartiment.

Influence de l'élévation de l'udomètre. — Deux udomètres identiques, exposés en un même lieu à des hauteurs différentes, ne recueillent pas la même quantité d'eau ; le plus élevé en contient toujours un peu moins que l'autre. A l'observatoire de Paris, d'après les observations faites de 1817 à 1838, l'épaisseur moyenne de la couche d'eau reçue dans un udomètre placé dans la cour, a été de 570^{mm}, tandis qu'un instrument identique placé sur la terrasse, à 28^{m} plus haut, n'avait reçu que 500^{mm}. Des résultats analogues ont été observés par M. Heberden, aux tours de l'abbaye de Westminster. MM. Philipp et Grey, en 1831, placèrent un udomètre sur la tour de la cathédrale d'York, élevée de 61^{m}, un autre à une hauteur de 10^{m}, et un troisième sur le sol, loin de tout bâtiment ; ils trouvèrent pendant plusieurs années, pour les trois udomètres, des résultats entre eux comme 14, 19 et 25.

Pour expliquer ce phénomène, on a pensé d'abord que les gouttes grossissaient pendant leur chute, en condensant à leur surface très froide l'humidité de l'air qu'elles traversaient. Mais il faudrait alors, pour le cas de l'observatoire de Paris, que l'accroissement fût de plus de 0,1 ; c'est 7 ou 8 fois plus qu'il n'est vraisemblable dans le parcours d'une hauteur de 28^{m}. De plus, il devrait arriver, au moins quelquefois, que les gouttes diminueraient par l'évaporation en traversant des couches d'air de plus en plus chaudes, comme cela a lieu quand la pluie n'arrive pas jusqu'à terre (1175) ; or, l'augmentation est constante. On a ensuite invoqué l'influence du vent qui, plus fort au sommet des édifices que près de terre, doit entraîner la pluie plus obliquement dans l'udomètre le plus élevé ; mais il est facile de voir que les lignes que suivent les gouttes d'eau sont plus rapprochées quand elles marchent obliquement que lorsqu'elles descendent verticalement, de manière qu'il en tombe toujours le même nombre sur une même étendue de surface.

On a encore dit que le vent, en se divisant autour de l'appareil, produisait des remous et éprouvait, tant sur les côtés qu'en dessus, des augmentations de vitesse, d'où résulterait l'éparpillement des gouttes d'eau en dehors de l'appareil. M. Maille a principalement développé cette explication, qui nous semble la meilleure, et l'a appuyée sur des observations nombreuses[1]. Il a remarqué aussi que l'édifice même sur lequel se trouve l'un des udomètres, produit des remous et des changements de vitesse du vent, qui doivent avoir de l'influence sur la quantité d'eau recueillie. En conséquence, M. Maille propose de placer l'udomètre près du sol, et d'isoler l'entonnoir, du corps de l'instrument, avec lequel il communiquerait par un tube vertical.

[1] *Comptes-rendus des séances de l'Académie des sciences* de Paris, t. XXXIII, p. 602.

1184. Répartition des pluies à la surface du globe. — L'étude des quantités de pluie qui tombent annuellement et pendant les différentes saisons, est un des points les plus importants de la climatologie. Les premières observations suivies ont été faites par Sedileau, en 1688, à la demande de Louvois. Cette étude est appelée à rendre de grands services à l'agriculture, surtout quand il s'agit d'introduire de nouvelles cultures. Par exemple, on a voulu essayer de cultiver le cotonnier dans les provinces d'Alger, d'Oran et de Constantine; on a obtenu une récolte admirable dans l'un de ces points, médiocre dans un autre, et presque nulle dans le troisième. Cette différence provient simplement des époques différentes des pluies dans les trois provinces. Si les colons eussent été avertis de cette circonstance, ils auraient évité des essais ruineux. Après les désastreuses inondations de la Saône, en 1840, on a institué une commission chargée de mesurer la quantité de pluie qui tombe dans le bassin de cette rivière, et au moyen des résultats fournis par l'udomètre, on a pu annoncer plusieurs fois l'arrivée des crues, et même indiquer, à quelques décimètres près, la hauteur que devaient atteindre les eaux. Les inondations qui ont ravagé, en 1855, les départements traversés par nos grands cours d'eau, ont fait comprendre plus que jamais l'utilité de semblables observations. On doit à M. de Gasparin le travail le plus étendu sur la *pluviométrie*[1]; nous lui empruntons une partie de ce qui suit.

Pluies entre les tropiques. — Entre les tropiques, les pluies sont soumises à une périodicité annuelle régulière, et la théorie de M. Babinet (1175) rend compte de la manière la plus heureuse de leur répartition.

Dans l'Océan atlantique, partout où régnent les vents alizés, il n'y a pas de pluie; mais il pleut souvent dans la région des calmes. Les vents alizés rencontrent ensuite la côte nord-ouest de l'Amérique méridionale, s'élèvent, et donnent des pluies qui alimentent les bassins de l'Amazone et de l'Orénoque. Ils franchissent ensuite la Cordillière du Pérou, et descendent dans la plaine de Lima, où il ne pleut jamais, parce que l'air, déjà privé d'une partie de son humidité, s'échauffe et se dessèche en s'abaissant. Arrivés dans le Grand-Océan, les vents alizés prennent de nouvelles vapeurs, remontent les côtes orientales de la Chine et y déposent d'immenses cours d'eau. Ils traversent ensuite l'Océan indien et arrivent en Afrique, où ils se heurtent aux montagnes de l'Abyssinie, et donnent les pluies qui alimentent le Nil; ils passent ensuite, à l'état de vent sec, sur les parties centrales de l'Afrique.

Zones d'après les pluies. — Les météorologistes distinguent plusieurs zones d'après la distribution des pluies suivant les saisons. La première est la zone à deux périodes de pluies annuelles, tendant à se confondre de manière à former des pluies continuelles; elle s'étend le long de l'équateur. Puis viennent deux zones à pluies *semi-annuelles*, s'étendant de l'équateur à l'un

[1] *Bibliothèque britannique* (Sciences et arts), t. XXXVIII, p. 54, 263.

et l'autre tropique; on y distingue la *saison des pluies*, qui dure 6 mois, mais se réduit à 3 mois, en se rapprochant du tropique. Cette saison commence quand le soleil passe au zénith. La *saison sèche* a lieu quand le soleil se trouve du côté opposé de l'équateur. De Humboldt rend compte de ces faits de la manière suivante : le soleil échauffe davantage la zone torride dans l'hémisphère où il se trouve ; il y a donc appel de l'air du pôle voisin et de l'air d'équateur. La rencontre de ces deux courants, l'un froid, l'autre chaud et humide, donne lieu à une précipitation abondante de vapeur. Dans l'autre hémisphère, au contraire, l'air en mouvement parcourt des régions de plus en plus échauffées, et il y règne la saison sèche. Dans les Indes, la saison des pluies a lieu pendant la mousson du sud-est (1146) ; l'air, soulevé par le versant méridional de l'Himalaya, se refroidit, la vapeur qu'il contient se précipite et sert à alimenter le bassin du Gange. La mousson d'automne amène, au contraire, la saison sèche.

En dehors de la zone torride, la périodicité des pluies n'offre plus la même régularité. M. de Gasparin est parvenu cependant à saisir la marche générale du phénomène. — En s'éloignant de l'équateur suivant le méridien de l'Atlantique, on trouve toujours le maximum de pluie en été jusque vers la latitude de 30°, où les vents du sud-ouest s'abaissent (1147), se mêlent à un air plus froid, tout en rencontrant un sol moins échauffé, et précipitent beaucoup de vapeur. On aura là encore une zone à pluies d'été, parce que les effets sont d'autant plus prononcés que le vent du sud-ouest est plus chaud. Du reste, plus on s'avance vers le nord, plus les pluies sont fréquentes dans les autres saisons, et on finit par trouver une zone dans laquelle il pleut également en toutes saisons. En approchant davantage du pôle, on trouve une zone à *pluies hyémales*, signalée par de Buch sous le nom de *zone subtropicale*. C'est qu'alors les vents polaires dominent, s'échauffent et se dessèchent en s'avançant vers le sud, ce qui donne un climat relativement sec, surtout pendant l'été, où le soleil reste constamment sur l'horizon ; pendant l'hiver, au contraire, chaque vent du sud donne de la pluie en rencontrant des régions où le soleil ne paraît plus. Cet état de choses a déjà lieu au nord des îles britanniques, en Islande, au nord de la Sibérie.

La répartition des pluies est à peu près la même que dans l'Atlantique, au nord de l'ancien continent, à partir de la région où dominent les vents du sud-ouest (1149). Mais plus près de la bande équinoxiale à pluies d'été, on trouve une bande sèche formée par les déserts de l'Afrique, puis vient une bande à pluies d'hiver; les vents du sud ne précipitant leur vapeur peu abondante, que par leur rencontre avec les vents du nord, fréquents surtout en hiver. M. Fournet a publié un Mémoire remarquable sur les zones sans pluie et les déserts [1].

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XI, p. 116 et 197.

1185. Quantités annuelles de pluie en différents lieux. — Pour obtenir des moyennes annuelles certaines, il faut réunir un grand nombre d'observations, car il suffirait d'une averse exceptionnelle pour doubler la quantité d'eau qui tombe moyennement dans l'année.

On peut dire que, en général, la quantité *annuelle* de pluie va en diminuant quand la latitude s'élève, comme on le voit dans le tableau qui suit. Mais cette loi souffre de nombreuses anomalies provenant des influences locales, qui sont principalement la direction des vents régnants, le voisinage et l'orientation des chaînes de montagnes, la proximité des côtes et leur configuration, la hauteur au-dessus du niveau de la mer.

LATITUDE.	LIEUX.	QUANTITÉ de pluie en millimètres	LATITUDE.	LIEUX.	QUANTITÉ de pluie en millimètres
5°,5'	Christianborg (Guinée)	549,0	37° à 43°	Italie, S. de l'Apennin	930,0
7,35	Kandy	1864,9	43 à 47	Vallée du Rhône	781,9
12,25	Seringapatam	601,6	45 à 47	Italie, N. de l'Apennin	1336,9
18,56	Bombay	2350,0	43 à 47	France septentrionale.	656,8
22,33	Calcutta	1928,6	45 à 54	Allemagne	678,0
23,9	La Havane	2320,7	50 à 56	Angleterre	784,0
29,57	Nouvelle-Orléans	1270,0	55 à 62	Scandinavie	478,0
32,27	Madère	757,0	60	Bergen	2250,0
36,47	Tunis	1992,0	55 à 60	Russie	403,9
41,38	New-Bedfort (Et.-Un.)	1257,8			

Influence des vents en Europe. — Le vent humide du sud-ouest, qui prédomine dans la plus grande partie de l'Europe, amène surtout de la pluie, parce qu'il s'avance vers des régions plus froides, et s'élève sur le relief du continent. Le vent du nord-est, par des motifs opposés, ne donne presque jamais de pluie. D'après M. de Buch, sur 100 pluies qui tombent à Berlin, il en tombe les nombres qui suivent par les différents vents :

N	N.E	E	S.E	S	S.O	O	N.O
4,1	4	4,9	4,9	10,2	32,8	24,8	14,2

Par les vents de S.O, la pluie est fine et tombe pendant longtemps. Si le vent du N.E donne de la pluie, c'est surtout en hiver, quand il souffle brusquement à travers un air plus chaud ; la pluie est alors formée de grosses gouttes, et ne dure que peu de temps.

Influence des montagnes. — On remarque, en Europe, que les lieux situés au sud ou au sud-ouest des chaînes de montagnes sont des points pluvieux ; ce qui s'explique, dans la théorie de M. Babinet, par l'obstacle que

rencontrent les vents humides du sud et du sud-ouest. Par exemple, Bergen, placé au pied du plus haut massif des Alpes scandinaves, présente le point le plus pluvieux de l'Europe ; il y tombe annuellement $2^{m},25$ d'eau. En général, il pleut très souvent en Norwége par les vents du sud-ouest, pendant que le ciel est serein en Suède. Dans ce dernier pays, la pluie est amenée le plus souvent par les vents d'est ; il en est de même dans la Finlande, ce qui prouve que ce résultat ne provient pas seulement du voisinage de la mer Baltique. La plaine de Chambéry, située au sud-ouest du mont Blanc ; Bourg, Marciat, Saint-Rambert, adossés au Jura ; Saint-Etienne, Joyeuse, au sud des Cevennes ; Gênes, Pise, au sud des Apennins..., sont autant de centres pluvieux. Le fond de la mer Adriatique, où les vents du sud rencontrent un cirque de montagnes, présente une des régions les plus pluvieuses de l'Europe.

Influence du voisinage de la mer. — Les vents de mer donnent généralement de la pluie. En se heurtant au relief des côtes, ils donnent d'abord beaucoup de pluie ; plus loin, la quantité va en diminuant pour croître de nouveau. Ainsi, en marchant dans la direction du sud-ouest au nord-est, les quantités annuelles de pluie sont :

La Rochelle.	Tours.	Paris.	Auxerre.	Laon.	Metz.	Manheim.	Berlin.
$655^{mm},3$	565,5	568,5	627,2	669,1	719,6	571,8	522,7

En Russie, on remarque des résultats semblables.

Les côtes de la Méditerranée se trouvent dans une situation exceptionnelle : les vents du sud-ouest, avant d'y parvenir, ont déposé leur eau à la rencontre des montagnes de l'Espagne, des Pyrénées et des Alpes ; ils sont d'ailleurs détournés par les vents du sud, vents chauds et secs qui viennent d'Afrique ; aussi, le vent de mer ne donne que peu de pluie sur les côtes de la Méditerranée, sauf dans des localités privilégiées. Ainsi, dans la vallée du Rhône, il tombe moins de pluie qu'en Allemagne. L'italie, entourée d'eau de tous les côtés, présente de grandes anomalies : à Padoue, la pluie est amenée le plus souvent par les vents du nord et du nord-est ; à Rome, par les vents du nord et du sud.

Influence de l'altitude. — On admet généralement que la quantité de pluie augmente avec l'altitude. Ce résultat, qui souffre de nombreuses exceptions, se vérifie principalement dans les bassins des grands fleuves ; mais comme on s'éloigne de la mer en les remontant, et qu'on se rapproche des montagnes où ils prennent leur source, on entrevoit que les résultats pourraient bien tenir à des causes autres que la différence de niveau.

1186. Répartition annuelle des pluies en Europe. — M. de Gasparin a découvert le fait le plus considérable relativement à la quantité de pluie qui tombe dans les différentes saisons : il a reconnu que l'Europe se partage en deux zones : l'une au *nord-est*, dans laquelle le maximum de pluie tombe en été ; l'autre au *sud-ouest*, où le maximum tombe en automne. La limite qui

sépare les deux bandes, passe tantôt par des chaînes de hauteurs ou des plateaux élevés ; alors elle est fixe ; tantôt par des plaines sans relief considérable ; alors elle est variable et mal déterminée. Voici la direction que M. de Gasparin assigne à la ligne de démarcation : la Grande-Bretagne, où les pluies sont à peu près égales en été et en automne, appartient à cette ligne, qui passe ensuite par le canal qui sépare l'Angleterre du continent, puis par Paris, qui semble appartenir tantôt à une bande, tantôt à l'autre, suivant les années ; la ligne revient alors vers l'ouest, un peu avant d'atteindre Auxerre, et enveloppe la partie centrale de la France, qui fait partie de la bande à pluies d'été, en laissant en dehors l'Aunis, la Saintonge, la Guienne et le Languedoc, passe par Bourg et Genève, suit les Alpes en se dirigeant vers le sud, jusqu'à leur point de jonction avec les Apennins. De là, elle remonte au nord, laissant à l'ouest Turin et Milan ; gagne les Alpes qu'elle suit jusqu'à l'Adriatique ; et longe ensuite la chaîne des Karpathes, en laissant Bude dans la zone automnale. Cette dernière bande s'étend au sud jusqu'à l'Atlas, les cataractes du Nil, le Darfour et l'Abyssinie. Voici le tableau des quantités moyennes de pluie qui tombent dans les deux zones aux différentes saisons, en faisant abstraction de l'Italie au nord des Apennins, à cause des anomalies que nous avons signalées (1185).

	Année.	Hiver.	Printemps.	Été.	Automne.	Hiver et automne.	Printemps et été.
Bandes à pluies d'automne....	789mm,7	196,8	162,8	174,0	265.1	452,9	334,8
Bandes à pluies d'été.........	506,3	82,7	94,7	189,0	139,9	222,6	283,7

La *fig.* 863 permet de se rendre compte d'un seul coup d'œil des quantités relatives de pluie qui tombent dans les deux bandes pendant chaque mois. La courbe AA correspond à la bande à pluies d'automne, et la courbe EE à celle des pluies d'été. On voit que, dans la bande automnale, le minimum de pluie tombe en juin, et qu'il y a trois maximum, en mai, en juillet et en novembre, où se trouve le maximum absolu. Dans la zone à pluies d'été, il n'y a qu'un maximum, qui tombe en août ; le minimum a lieu en janvier.

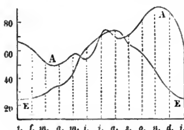


Fig. 863.

Nous joignons ici le tableau des quantités moyennes de pluie qui tombent à Paris dans les différents mois :

Janvier.	38mm	Mai.	60mm	Septembre.	51mm
Février.	41	Juin.	61	Octobre.	37
Mars.	28	Juillet.	59	Novembre.	47
Avril.	53	Août.	51	Décembre.	38

La somme de ces nombres donne 564^{mm}, pour moyenne de l'année. De 1817 à 1829, la quantité annuelle a varié, à Paris, de 470^{mm} à 690^{mm}.

1187. Répartition des jours de pluie. — Il ne suffit pas dans la climatologie, et pour l'agriculture, de savoir quelle quantité de pluie tombe en un même lieu ; il faut encore connaître le nombre de fois qu'il pleut pour fournir cette quantité d'eau, et surtout les nombres de jours de pluie par saison et par mois. En général, les nombres de jours de pluie augmentent en même temps que la quantité de pluie. Ces nombres croissent donc quand la latitude diminue. Voici quelques exemples :

Zone torride.	Angleterre.	Nord de la France et Allemagne.	Scandinavie.	Russie.
159 jours	155	144,9	133,2	100,9

Moyenne par jour. — En divisant la quantité de pluie tombée pendant l'année, la saison ou le mois, par le nombre des jours de pluie pendant la même période, on a la moyenne de pluie par jour pendant cette période. On voit dans le tableau suivant, les nombres de jours de pluie pendant les différentes saisons dans diverses régions de l'Europe, avec les moyennes par jour :

RÉGIONS.	JOURS DE PLUIE.				QUANTITÉ MOYENNE par jour.				
	hiver	printemps.	été.	automne.	année.	hiver.	printemps.	été.	automne.
					mm	mm	mm	mm	mm
Angleterre à l'ouest.	43,4	37,6	33,9	44,9	5,9	5,6	4,5	6,5	6,3
Id. à l'est.	40,0	39,5	34,4	34,8	4,5	4,2	3,6	5,0	5,2
Côtes de l'ouest.	34,4	34,4	32,9	38,0	5,4	5,4	4,1	5,1	6,4
France méridion., Italie du sud.	25,4	25,2	15,2	25,4	8,9	7,7	7,7	8,8	13,5
Italie du nord.	25,4	27,1	25,1	26,6	9,8	5,5	9,3	10,9	11,3
France du nord, Allemagne. .	36,1	37,0	36,8	35,0	4,7	3,4	4,0	6,2	5,5
Scandinavie.	35,2	30,3	32,6	35,1	3,6	2,3	2,5	5,2	4,2
Russie.	23,1	23,4	27,9	26,5	3,6	1,8	2,6	6,6	3,6

Les moyennes par jour de la France méridionale et de l'Italie expliquent les inondations qui ravagent souvent ces contrées pendant l'automne.

Les régions où les nombres moyens de pluies par jour sont les plus élevés, sont aussi celles où l'on observe des chutes d'eau exceptionnelles. Parmi les *pluies majeures*, nous citerons les suivantes : à Bombay, en 1819, il est tombé en un seul jour 162^{mm} d'eau ; à Cayenne, M. Roussin en a vu tomber 280^{mm}, de 8 heures du soir à 6 heures du matin, ce qui fait 28^{mm} par heure. En 1827, il tomba, à Joyeuse, 791^{mm},7 en 24 heures, ce qui causa les inondations de

l'Ardèche. Le résultat le plus étonnant qu'on puisse citer a été observé à Gênes le 25 octobre 1822 : il tomba en une seule pluie près de 1 mètre d'eau, soit 812 millimètres.

V. Corrélation des phénomènes météorologiques.

1188. En nous reportant à l'ensemble des faits examinés dans ce chapitre, il est facile de voir que les divers phénomènes météorologiques dépendent les uns des autres et se modifient mutuellement. La cause générale dont ils dépendent tous est l'action solaire. En effet, les vents sont la conséquence de la manière dont la chaleur se distribue à la surface du globe, et la pluie est produite par les vents. A leur tour, les vents et la pluie réagissent sur la température de l'atmosphère; les premiers en l'élevant ou l'abaissant, suivant leur direction; les pluies, en rafraîchissant l'air quand il fait chaud. Toutes les modifications qu'éprouve l'atmosphère sont accompagnées de variations de pression ; les mouvements du baromètre sont donc le signe des changements atmosphériques, aussi a-t-on remarqué de bonne heure des relations entre la hauteur du mercure dans cet instrument et l'état du temps (I, 310). Deluc expliquait les variations du baromètre par le mélange de la vapeur à l'air, en plus ou moins grande proportion; quand il y a beaucoup de vapeur, l'air serait plus léger, et en même temps il y a probabilité qu'il pleuve. Mais, on peut dire, au contraire, que cette vapeur ajoutant son élasticité à celle de l'air, il devrait y avoir, au moins au premier moment, accroissement de pression. De plus, les variations barométriques devraient être plus prononcées dans les pays chauds, où l'évaporation est la plus active, et c'est le contraire qui a lieu (I, 393).

Explication des prédictions du baromètre. — Quand un vent chaud succède à un vent froid, le baromètre baisse ; l'air dilaté, à égale élasticité, étant moins pesant que l'air froid. Les vents froids et secs font, au contraire, monter le baromètre. En Europe, la pression atmosphérique diminue donc par les vents du sud et du sud-ouest, et augmente par les vents du nord et du nord-est (1151). Or, ce sont les premiers qui amènent la pluie, tandis que les autres sont secs. De là l'explication des relations entre les hauteurs du baromètre et l'état du temps. On voit que ces relations tiennent à la situation géographique de l'Europe; et, en effet, les vents chauds de terre de la Nouvelle-Hollande font baisser le baromètre et amènent la sécheresse; et, à l'embouchure de la Plata, les vents d'est, qui amènent la pluie, le font monter.

En Europe, quand le baromètre monte peu à peu, c'est que les vents du nord chassent ceux du sud, et le vent se met au beau; cependant la rencontre de ces vents, au premier moment, peut donner un peu de pluie (1175); alors on a de la pluie pendant que le baromètre est haut. Bouvard avait déjà remarqué que

dans ce cas il y a rencontre entre deux courants d'air. De Buch a constaté, à Berlin, que lorsqu'il pleut longtemps, le baromètre se tient généralement à 5mm environ au-dessous de la moyenne qui correspond au vent régnant. Le vide formé par la condensation continue de la vapeur explique ce résultat.

Pendant les averses, on voit souvent le baromètre monter de quelques dixièmes de millimètres, et souvent revenir à son premier point quand le nuage s'éloigne. Ce résultat se remarque souvent pendant les orages, et, d'après M. Kaemtz, on peut affirmer que le plus fort est passé quand le mercure commence à redescendre. M. Kaemtz attribue ce résultat au refroidissement de l'air par la pluie. Mais nous pensons qu'il faut plutôt y voir un effet mécanique dans lequel les couches inférieures de l'atmosphère sont refoulées et comprimées par la chute d'innombrables gouttes de pluie. Un phénomène analogue se passe quand des parcelles en suspension se déposent au fond de l'eau; car un aréomètre plongé dans l'eau trouble, est d'abord soulevé, puis s'enfonce peu à peu à mesure que le liquide se clarifie; ce qui est dû à la réaction que l'eau éprouve sur le fond du vase, après y avoir été entraînée par le mouvement des particules qui se déposent.

Pendant les pluies continues, le baromètre baisse avec les vents d'est et monte avec ceux qui viennent de l'ouest. Cette remarque est due à M. Dove.

Pendant les tempêtes, le baromètre qui a préalablement baissé, éprouve des oscillations assez étendues. Du reste, comme l'a remarqué Scoresby, la tempête ne commence que quand le baromètre cesse de baisser. L'observation de cet instrument permet donc de prévoir les grands mouvements atmosphériques; aussi les navigateurs doivent-ils le consulter fréquemment. Krusenstein attribue à cette habitude, d'avoir toujours pu prévoir les coups de vents. Scoresby affirme que le baromètre lui permettait de prédire les tempêtes 17 fois sur 18.

Il résulte des recherches de M. Kaemtz, qu'une tempête est surtout imminente quand le baromètre baisse rapidement, en même temps que la température est élevée. Du reste, quand l'air se meut rapidement, la pression doit diminuer du côté d'où il vient, et monter dans la région vers laquelle il se porte. Ces deux régions peuvent être extrêmement éloignées l'une de l'autre, et appartenir à des continents différents. Woodward, Wallis, Brandes, Pictet avaient déjà remarqué des variations inverses et simultanées du baromètre dans des régions très éloignées de l'Europe. M. Kaemtz en cite plusieurs exemples. Des observations faites en un grand nombre de points différents pourraient jeter du jour sur ces sortes de phénomènes. Les observations suivies de M. Quetelet à Bruxelles, qui ont déjà jeté un jour si remarquable sur les relations entre la pression et la fréquence de la pluie, et celles de M. Kaemtz à Dorpat, ont déjà fait faire un grand pas à la question.

Des pronostics. — La corrélation qui existe entre les divers phénomènes atmosphériques a fait concevoir la possibilité de prévoir les changements de temps. Aux époques les plus reculées, les agriculteurs ont cherché à résoudre ce problème compliqué; mais il est vrai qu'on ne peut arriver à un résultat

certain; on ne peut obtenir que des probabilités, et encore faut-il, pour qu'elles soient assez grandes, que l'époque considérée soit peu éloignée de celle où l'on observe. Par exemple, on pourra, d'après des observations faites le matin ou le soir, prédire quel temps il fera *probablement* dans la journée, ou le lendemain. Mais s'il s'agit de mois, de saisons, on ne pourra généralement rien avancer avec quelque probabilité. L'impuissance dans laquelle on se trouve à cet égard tient aux distances et aux hauteurs considérables auxquelles se préparent, pour ainsi dire, les phénoménes qui doivent décider de l'état du temps. Par exemple, s'il règne en une région, un vent sec et froid qui présage un beau temps de longue durée, il peut se faire qu'au même moment, s'avance au loin un vent chaud et humide qui, se mêlant avec le vent froid, occasionnera de la pluie qu'on n'aura pu prévoir. L'application du télégraphe électrique à la transmission instantanée des observations faites au même instant dans les régions les plus éloignées, permettra sans doute un jour de pronostiquer avec une trés grande probabilité, mais jamais avec certitude, car on ne connaîtra jamais que l'état actuel en différents lieux, et cet état peut changer dans un bref délai.

Il est évident que les instruments qui, comme le baromètre, font connaître l'état atmosphérique existant dans un très grand espace, fourniront les bases les plus convenables pour un bon pronostic. L'hygromètre, et surtout le thermomètre, qui indiquent l'état de l'air au point où ils sont exposés, donnent les indications les moins certaines. Après les observations barométriques et celles de la direction du vent, dont nous avons suffisamment traité, celles qui conviennent le mieux pour établir un pronostic, sont l'observation des nuages, et celle de la pureté de l'air.

Quand l'air est bien transparent, que les étoiles scintillent vivement, c'est qu'il y a beaucoup d'humidité dans les hautes régions de l'atmosphére, et il y a chance de pluie pour le lendemain. Il en est de même quand le soleil est d'un rouge foncé à son coucher; c'est qu'alors ses rayons traversent des vapeurs en voie de précipitation. L'air sec est peu transparent, et quand il paraît légérement trouble, on peut compter sur le beau temps.

Dans nos climats, les cumulus annoncent le beau temps, leurs contours arrêtés attestant un air sec dans lequel ils se dissolvent, pour ainsi dire, rapidement. Les cirrus et les stratus, qui accompagnent souvent les vents d'ouest ou de sud-ouest, peuvent être considérés comme des signes de pluie.

FIN DU SECOND VOLUME.

ERRATUM.

page 112	ligne 18	au lieu de :	*empyrique*	lisez :	*empirique*
117	9 en rem.	au lieu de :	$\varphi\ (0)$	lisez :	$\varphi\ (\theta)$
118	7 en desc.	au lieu de :	représentée	lisez :	remplacée
126	25 et 26	au lieu de :	*avec la température*	lisez :	*quand la température diminue*
252	3	au lieu de :	*bróme*	lisez :	*brome*
537	18	au lieu de :	$\frac{1}{\sin 2x}$	lisez :	$\frac{1}{\sin x}$

TABLE DES MATIÈRES

DU SECOND VOLUME.

LIVRE IV.

DE LA CHALEUR.

Pages.

CHAP. I. — DE LA CHALEUR EN GÉNÉRAL.

§ 1. — Nature de la chaleur. Effets généraux. Système de l'émission et des oudulations. 6

§ 2. — Mesure des températures. 10

I. *De la température en général.* 10

II. *Des thermomètres.* — Thermomètre à mercure. Graduation. Echelles thermométriques. Therm. de précision; à poids; à alcool; différentiels. Thermomultiplicateur. 13

CHAP. II.

CHALEUR RAYONNANTE.

§ 1. — Marche des rayons dans un même milieu. 37

I. *Transmission à distance.* — Lois. Rayons de chaleur. 37

II. *Réflexion de la chaleur.* — Lois de la réflexion. Miroirs paraboliques, sphériques. Miroirs ardents. Réflexion diffuse. 40

§ 2. — Réfraction de la chaleur. 47

I. *Pouvoir diathermane.* 47

II. *Réfraction de la chaleur.* — Prismes. Verres ardents. 53

§ 3. — Thermochrose. 57

I. *Thermochrose des rayons.* — Absorption des divers rayons. Lois. Spectre calorifique. 57

II. *Thermochrose des corps.* — Diffusion.. 67

III. *Identité d'origine de la chaleur et de la lumière.* — Impressions de chaleur. 71

§ 4. — Passage de la chaleur par la surface des corps. — Loi de Newton 75

I. *Pouvoir émissif.* — Influence de la température, du poli. Théorie de Melloni 76

II. *Pouvoir réflecteur.* — Variation avec l'incidence. Pouvoir diffusif. . 84

III. *Pouvoir absorbant.* — Influence du poli, de la nature des rayons. Comparaison au pouvoir émissif.. . 92

§ 5. — Equilibre de la chaleur rayonnante. — Intensité suivant la distance; l'obliquité. Equilibre dans une enceinte.. 102

§ 6. — Lois du refroidissement. Refroidissement dans le vide; dans les gaz. Influence de l'enceinte. . 110

CHAP. III. — CONDUCTIBILITÉ.

§ 1. — Conductibilité des solides. 132
I. *Corps homogènes.* — Lois des températures dans un mur; dans une barre; dans un fil. 132
II. *Corps non homogènes.*—Cristaux 150
§ 2.—Conductibilité des fluides. Liquides. Gaz. 154

CHAP. IV. — DILATATIONS.

§ 1. — Dilatation des solides. 162
I. *De la dilatation en général.* . . 162
II. *Mesure de la dilatation linéaire entre 0° et 100°.* — Formules des dilatations. 165
III. *Dilatation cubique. Dilatation au-delà de 100°.* — Dilatation des enveloppes, des cristaux. . . . 170
IV. *Applications des dilatations.*— Pendules compensateurs. Pyromètres 178
§ 2. — Dilatation des liquides.
I. *Dilatation absolue du mercure.* 186
II. *Liquides autres que le mercure.* Dilatation au-dessus du point d'ébullition.. 194
III. *Dilatation de l'eau.* — *Maximum de densité.* — Dissolutions salines.. 201
§ 3. — Dilatation des gaz. . . 208
I. *Mesure de la dilatation des gaz.* Cas des hautes températ. Recherches de M. Regnault. 208
II. *Comparaison des thermomètres.* — *Pyromètre à air.* 224
III. *Mesure de la densité des gaz.* 229
IV. *Applications de la dilatation de l'air.* 237

CHAP. V.

CAPACITÉS CALORIFIQUES.

§ 1. — Capacités des solides et des liquides.. 241
I. *Mesure des chaleurs spécifiques.* Résultats généraux. 242
II. *Loi des atomes.* — Cas des corps simples. Cas des corps composés. . 254
§ 2. — Chaleur spécifique des gaz. — Recherches de MM. Delaroche et Bérard, De la Rive et Marcet... Travaux de M. Regnault. Capacité des vapeurs. 267

CHAP. VI. — CHANGEMENTS D'ÉTAT DES CORPS. — VAPEURS.

§ 1. — Fusion et solidification. 283
I. *Fusion des corps solides.* 283
II. *Solidification des liquides.* — Surfusion. Influence de la pression. Changements de volume. 286
III. *Liquéfaction par dissolution.* Mélanges réfrigérants. 298
IV. *Mesure de la chaleur latente de liquidité.* — Relation avec les chaleurs spécifiques. 305
§ 2. —Passage à l'état gazeux, et liquéfaction des gaz. 321
I. *Phénomènes généraux.* — Froid produit par l'évaporation. 321
II. *Formation des vapeurs à la surface.* — Vapeurs dans le vide. Mélange avec les gaz. 325
III. *Ebullition.* — Effets de la pression; de la surface du vase. Vases très chauds. Effet de la cohésion du liquide. Substances dissoutes. . 334
IV. *Liquéfaction des gaz.* 352
§ 3. — Propriétés physiques des vapeurs. 357
I. *Mesure de la force élastique.* — Vapeur d'eau. Liquides autres que l'eau. 357
II. *Mesure de la chaleur latente des vapeurs.* — Vapeur d'eau. Hautes pressions. Liquides autres que l'eau.. 369
III. *Mesure de la densité des vapeurs;* de la vapeur d'eau sous différentes pressions; dans l'air à saturation. Vapeurs des divers liquides 379
§ 4. — Machines à vapeur. . . 388
I. *Machines fixes.* — Calcul du travail. Applications industrielles. . . 388

II. *Chaudières à vapeur.* — Alimentation Appareils de sûreté. Causes d'explosion. 416
III. *Navires à vapeur et locomotives.* Propulseur des navires, hélice. Locomotives. 430
IV. *Machines dont le jeu est semblable à celui des machines à vapeur.* — Machines à air comprimé, dilaté. Moteurs à gaz. . 447

CHAP. VII.

SOURCES DE CHALEUR.

§ 1. — Sources artificielles. . . 452
I. *Actions mécaniques.* — Frottement. Déformation. Compression. Froid produit par l'expansion des gaz. 452
II. *Combinaisons chimiques.* — Combustion. Flamme. Propriétés des toiles métalliques. Chalumeau. 467
III. *Mesure de la chaleur des combinaisons chimiques.* — Combustions vives. Effets calorifiques dans les décompositions. Combinaisons par voie humide. 478
IV. *Equivalent mécanique de la chaleur.* — Théorie mécanique de la chaleur. 504
§ 2. — Sources physiologiques de chaleur. — Chaleur animale; sa mesure; son origine. Chaleur des végétaux. 517
§ 3. — Sources permanentes de chaleur. 525
I. *Chaleur propre du globe*; son origine. 525
II. *Chaleur solaire.* — Constitution du soleil. Quantité de chaleur qu'il fournit. 530

CHAP. VIII.

PHÉNOMÈNES MÉTÉOROLOGIQUES

DÉPENDANT DE LA CHALEUR.

§ 1. — Distribution de la chaleur à la surface du globe. 542
I. *Instruments d'observation.* — Thermomètres à maximum et à minimum; enregistreurs. 542
II. *Température de l'air en un même lieu.* — Moyenne d'un lieu. Marche diurne, mensuelle, annuelle. 548
III. *Température à différentes latitudes.* — Lignes isothermes, isothères, isochimènes. Températures extrêmes. Climats. 553
IV. *Température à différentes hauteurs.* — Lois du décroissement. Neiges perpétuelles. 562
V. *Température de l'espace.* — Effets du rayonnement nocturne. 571
VI. *Température de la terre et des eaux.* — Température du sol; de la mer, courants, glaces polaires; lacs et rivières. 577
§ 2. — Mouvements de l'atmosphère et des vents. 589
I. *Du vent.* — *Anémomètres.* . . . 589
II. *Vents réguliers.* — Brises. Moussons. Vents alizés. 601
III. *Vents irréguliers.* 607
§ 3. — Hydrométéores ou météores aqueux. 613
I. *Hygrométrie.* — Hygroscopes. Hygromètres. Méthodes hygrométriques. 613
II. *De la rosée et du givre.* 632
III. *Météores dus à la condensation de la vapeur dans l'atmosphère.* — Des nuages. Pluie. Neige. Brouillards. 636
IV. *Distribution de l'eau atmosphérique.* — Udomètres. Distribution des pluies. 647
V. *Corrélation des phénomènes météorologiques.* 656

FIN DE LA TABLE DES MATIÈRES.

TOULOUSE. — Typographie Bonnal et Gibrac, rue Saint-Rome, 46.



